МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Е. В. ЯНЧУК

ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

В ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 628

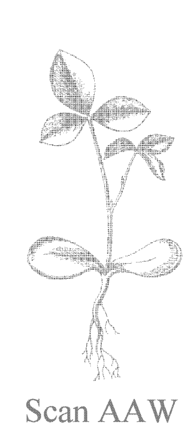
Е. В. ЯНЧУК

ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ В ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967



УДК 621.382.233.014.2

Янчук Е. В.

Я 66 Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах. М., «Энергия», 1967.

56 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 628) 40 000 экз. 15 к.

В брошюре приведены сведения по применению туннельных диодов в приемно-усилительных устройствах. Основное внимание уделено разбору типовых схем усилителей, генераторов (маломощных гетеродинов), детекторов и преобразователей частоты. Приводятся практические схемы и даются расчетные соотношения. Предназначена для подготовленных радиолюбителей, а также может быть полезна техникам и инженерам, интересующимся применением туннельных диодов.

3-4-5 / 317-67 6Ф2.13

Янчук Елена Владимировна

Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах

Редактор *А. А. Экслер*
Художественный редактор *А. М. Кувшинников*
Техн. редактор *Т. Г. Усачева*
Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 25/XI 1966 г. Подписано к печати 16/II 1967 г.
Формат 84×108$^{1}/_{32}$ Бумага типографская № 2
Т-01770 Усл. печ. л 2,94 Уч.-изд. л. 3,58
Тираж 40 000 экз. Цена 15 коп. Заказ 2729

Издательство „Энергия“, Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Основные свойства и вольт-амперная характеристика

В 1958 г. японским физиком профессором Токийского университета Лео Эсаки был открыт новый своеобразный полупроводниковый прибор, который вскоре после этого получил название туннельного диода, или диода Эсаки. Туннельным диод называется потому, что его работа основана на известном в квантовой механике туннельном эффекте.

От обычного полупроводникового диода туннельный диод отличается большой концентрацией примесей в *n* и *p* областях, весьма узким *p-n* переходом, большой проводимостью в обратном направлении и наличием падающего участка на прямой ветви вольт-амперной характеристики. Физика работы туннельного диода подробно описана в литературе и в данной брошюре не рассматривается.

На падающем участке вольт-амперной характеристики туннельный диод представляет собой активный двухполюсник, что позволяет широко использовать его в различного рода усилителях, генераторах, преобразователях, детекторах, вычислительных и запоминающих устройствах и др.

Большой интерес к новому полупроводниковому прибору и его быстрое распространение объясняется его способностью работать на весьма высоких частотах (10^{10}—10^{11} *гц*), широким интервалом рабочих температур (до 400° С), сравнительно низким уровнем собственных шумов (2—3 *дб*), малыми габаритами и весом, малым потреблением энергии, высоким допустимым уровнем радиации (до 10^{17} нейтронов на 1 *см*^{2}); высокой механической прочностью и надежностью работы, длительным сроком службы и простотой изготовления.

Основными недостатками туннельных диодов являются малая выходная мощность и отсутствие «внутренней» развязки между входом и выходом, что часто вызывает серьезные затруднения при их применении.

В табл. 1 показаны некоторые свойства туннельного диода по сравнению с другими полупроводниковыми и электровакуумными приборами (в схемах усилителей).

Основные параметры туннельного диода определяются его вольт-амперной характеристикой, которая имеет падающий участок. На этом участке увеличение напряжения на диоде вызывает уменьшение тока через него и, следовательно, возникает отрицательное сопротивление.

Таблица 1

Тип прибора	Параметры			
	максимальная частота, *Ггц*	максимальная рабочая температура, °С	потребляемая мощность, *вт*	коэффициент шума, *дб*
Туннельный диод . .	100	250 — 450	10^{-4}	2
Транзистор	10—20	60 — 150	10^{-3}	2 — 25
Параметрический усилитель	70	20	0,1	2
Вакуумный триод . .	10	200 — 700	0,1 — 1	12
Квантовый усилитель	До светового диапазона	4°К	400	0,2—1,5
Лампа бегущей волны (ЛБВ)	300	200 — 700	10	2 — 10

Устройства с отрицательным внутренним сопротивлением известны давно; достаточно, например, вспомнить электрическую дугу или динатронный эффект. Их можно разделить на две группы: стабильные по току и стабильные по напряжению. Характеристики приборов, стабильные по току (S-характеристики) показаны на рис. 1,*а*. К таким приборам относятся лавинные триоды, точечные транзи-

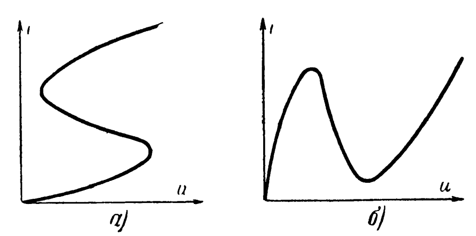


Рис. 1. Типы вольт-амперных характеристик приборов с отрицательным сопротивлением.

сторы в схеме с общей базой, *p-n-p-n* переключатели. Положение рабочей точки на S-характеристике однозначно определяется током и неоднозначно — напряжением.

Вольт-амперная характеристика туннельного диода по своему виду принадлежит к характеристикам, стабильным по напряжению (N-характеристика), т. е. положение рабочей точки на ней однозначно определяется заданным напряжением и неоднозначно — током (рис. 1,*б*).

На рис. 2 приведена вольт-амперная характеристика туннельного диода. Точку P_1 называют вершиной, точку P_2 — впадиной характеристики.

I_1 — максимальный туннельный ток, или пиковый ток.

I_2 — минимальный ток.

I_0 — ток в рабочей точке.

U_1 — напряжение, соответствующее максимальному току.

U_2 — напряжение, соответствующее минимальному току.

U_3 — напряжение, соответствующее диффузионному току, равному току максимума.

U_0 — напряжение в рабочей точке.

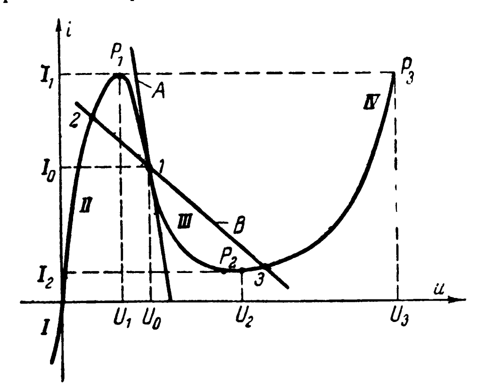


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

При отрицательном напряжении благодаря туннельному эффекту в *p-n* переходе обратный ток диода круто возрастает (участок *I* на рис. 2). При небольшом прямом смещении ток с увеличением напряжения увеличивается линейно (участок *II*), достигая острого максимума, затем падает до глубокого минимума (участок *III*) и, наконец, при дальнейшем увеличении смещения экспоненциально возрастает (участок *IV*). Отрицательное сопротивление туннельного диода ($-R_д$), определяемое наклоном касательной, проведенной на падающем участке характеристики, называется дифференциальным.

Модуль дифференциального отрицательного сопротивления, зависящего от положения рабочей точки, определяется как

$$|-R_д| = \frac{du}{di}.$$

В паспорте на туннельный диод иногда указывается интегральное сопротивление, равное

$$|-R'_д| = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1},$$

т. е. среднее значение модуля отрицательного дифференциального сопротивления.

Типы диодов

Первые туннельные диоды изготовлялись из германия и кремния. Позже стали использовать интерметаллические соединения элементов III и V групп таблицы Д. И. Менделеева—арсенид галлия ($GaAs$), антимонид галлия ($GaSb$), антимонид индия ($InSb$) и др.

Чтобы повысить вероятность туннельного эффекта, необходим очень узкий *p-n* переход (менее 100 Å), в то время как у обычных полупроводниковых приборов он составляет 10 000 Å. Этого добиваются применением специальной технологии и использованием материалов с весьма большим содержанием примесей, в сотни и тысячи раз выше, чем у обычных полупроводников.

Германиевый туннельный диод изготовляется путем сплавления монокристаллического германия, легированного фосфором или мышьяком, с индием, легированным галлием или алюминием. Концентрация примесей должна быть очень высокой — (2—5) $\cdot 10^{19}$ *атом/см*^{3}. Контакты изготовляются из олова. Величина максимального тока I_1 зависит от концентрации примесей и площади перехода.

Изменяя степень легирования *p* и *n* областей электронно-дырочного перехода, можно в широких пределах управлять основными параметрами туннельного диода, причем выбор той или иной степени легирования определяется требованиями применения, для которого изготовляются данные диоды. Так, для малошумящих усилителей необходимо минимальное произведение $I_0|-R_д|$, что имеет место у германиевых диодов с $U_1 \approx 40$ *мв*. С точки зрения повышения температурной стабильности параметров наилучшими оказались диоды с $U_1 \approx 60$ *мв*, а с точки зрения работы в диапазоне возможно больших частот — с $U_1 \geqslant 70$ *мв*. Диапазон рабочих температур германиевых туннельных диодов от 4° K (температура жидкого гелия) до +200° C.

Кремниевые туннельные диоды изготовляются сплавлением кремния с алюминием. Лучшими акцепторами для кремния являются бор и галлий, а донорами — мышьяк, сурьма и фосфор. Концентрация примесей 10^{19}—10^{20} *атом/см*^{3}. Область рабочих температур лежит в пределах от 4,2° K до +400° C. Значение пикового тока I_1 очень слабо зависит от температуры. Оно уменьшается всего на 4% при изменении температуры от +20 до +200° C.

Наилучшими высокочастотными свойствами обладают **туннельные диоды из антимонида индия** (InSb), однако они могут работать только при низких температурах и уже при комнатной температуре теряют свои туннельные свойства.

Туннельные диоды из антимонида галлия (GaSb) особенно хороши для работы в диапазоне СВЧ, так как обладают низким уровнем шумов. Они имеют произведение $I_0|-R_д|$ наименьшее из всех типов диодов и равное 0,043 *в*.

Туннельные диоды из арсенида галлия (GaAs) легируются цинком или оловом. Эти диоды имеют отношение I_1/I_2, равное 40—60, что позволяет применять их в логических схемах и генераторах повышенной (по сравнению с генераторами на других типах туннельных диодов) мощности. Диоды могут работать при температуре до +450° C. Минимальное произведение $I_0|-R_д|$ для этих диодов равно 0,12 *в*, т. е. по шумовым свойствам они уступают диодам, изготовленным из антимонида галлия и германия.

Нет такого «универсального» материала, чтобы туннельные диоды, изготовленные из него, обладали бы всеми оптимальными параметрами. Выбор материала определяется назначением и областью применения создаваемого прибора. Для сравнения различных типов диодов часто приводится величина отношения $C_д/I_1$, которая характеризует тип диода независимо от его материала. Здесь $C_д$ — емкость *p-n* перехода.

Таблица 2

Материал	Параметры							
	Напряжение U_1, *мв*	Напряжение U_2, *мв*	Напряжение U_3, *мв*	Максимальная рабочая температура, °C	Произведение $\|R_д\| C_д$, *сек*	Произведение $I_0 \|R_д\|$, *в*	Отношение I_1/I_2	Отношение $C_д/I_1$, *пф/ма*
Германий	40—70	280—430	400—600	250	$0{,}5 \cdot 10^{-9}$	0,06	5—15	1—40
Кремний	80—100	400—600	700—1 100	400	$0{,}2 \cdot 10^{-8}$	—	3—4	2—80
Арсенид галлия	90—120	450—600	800—1 300	450	$0{,}1 \cdot 10^{-9}$	0,12	8—70	0,1—5
Антимонид галлия	30—50	200—300	450	300	$0{,}1 \cdot 10^{-9}$	0,043	15—20	—
Антимонид индия	—	—	200	25	$0{,}5 \cdot 10^{-11}$	—	7—10	—

Сравнение некоторых свойств туннельных диодов, изготовленных из различных материалов, приведено в табл. 2.

Эквивалентная схема диода в области отрицательного сопротивления (для малых сигналов)

Эквивалентная схема диода приведена на рис. 3. Верхняя часть схемы содержит элементы собственно диода, а нижняя — элементы внешней цепи. На схеме приняты следующие обозначения:

$-R_д = du/di$ — дифференциальное отрицательное сопротивление туннельного диода, пропорциональное наклону падающего участка вольт-амперной характеристики в точке, определяемой смещением. Модуль дифференциального сопротивления $|-R_д|$ практически не зависит от частоты до 10^{13} *гц*, и он тем меньше, чем больше примесей содержится в *n* и *p* областях диода. Диод, работающий в диапазоне СВЧ, должен иметь малое значение $|-R_д|$. В то же время величина $|-R_д|$ не должна быть существенно меньше волновых сопротивлений волноводных и коаксиальных трактов, в которых работает диод, так как необходимо согласовать эти сопротивления в довольно широком диапазоне частот. Кроме того, малые значения $|-R_д|$ создают трудности для получения устойчивой рабочей точки в схеме подачи смещения и при подавлении паразитных колебаний в резонансной системе усилителя. Зависимость модуля дифференциального сопротивления диода от величины приложенного напряжения носит существенно нелинейный характер. Характер нелинейности влияет на динамический диапазон усилителя и на вид колебаний в генераторе.

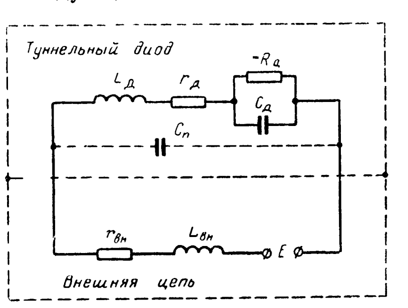


Рис. 3. Эквивалентная схема туннельного диода и внешней цепи.

$C_д$ — емкость диода, определяемая емкостью *p-n* перехода. Она изменяется в пределах падающего участка вольт-амперной характеристики примерно на 20%.

$r_д$ — суммарное сопротивление потерь в материале полупроводника, в контактах и выводах. Сопротивление $r_д$ имеет примерно одно и то же значение в пределах всего рабочего участка вольт-амперной характеристики.

$L_д$ — суммарная индуктивность диода, в которую входят индуктивность патрона и выводов; зависит в основном от геометрической формы выводов.

$C_п$ — паразитная емкость патрона и выводов прибора. У современных туннельных диодов эта емкость мала и в большинстве случаев ее можно не учитывать, поэтому на эквивалентной схеме она показана пунктиром.

$r_{вн}$, $L_{вн}$ — элементы, учитывающие параметры внешних проводов, нагрузки и параметры источника питания.

Числовые значения параметров $R_д$, $C_д$, $r_д$ и $L_д$ зависят от материала, из которого изготовлен туннельный диод, его конструктивного оформления, концентрации примесей и лежат в пределах: $|-R_д|=5$—500 *ом*; $C_д=1$—200 *пф* (у лучших диодов $C_д=0{,}2$—2 *пф*); $L_д=10^{-8}$—10^{-10} *гн*; $r_д=1$—15 *ом*.

Согласно рис. 3 туннельный диод можно представить комплексным сопротивлением:

$$Z = r_д + j\omega L_д - \frac{R_д \dfrac{1}{j\omega C_д}}{\dfrac{1}{j\omega C_д} - R_д} = r_д - \frac{R_д}{1+\omega^2 C_д^2 R_д^2} + j\left[\omega L_д - \frac{\omega R_д^2 C_д}{1+(\omega C_д R_д)^2}\right].$$

Частотный диапазон туннельного диода определяется его параметрами. Чтобы определить, до какой предельной частоты туннельный диод сохраняет свое отрицательное сопротивление, нужно определить критическую частоту, на которой отрицательное сопротивление диода компенсируется его собственными потерями. Предельная, или критическая, частота (иногда ее называют частотой среза) определяется из условия равенства нулю действительной части комплексного сопротивления Z:

$$\mathrm{Re}(Z) = r_д - \frac{R_д}{1+\omega^2 R_д^2 C_д^2} = 0,$$

откуда критическая частота

$$f_{кр} = \frac{1}{2\pi |-R_д| C_д} \sqrt{\frac{|-R_д|}{r_д} - 1}.$$

Следует различать предельную частоту собственного туннельного диода ($f_{кр}$) и предельную частоту схемы с включенным в нее диодом ($f_{ген}$). Под предельной частотой в обоих случаях понимается

максимальная частота, на которой может быть получена генерация. Критическая частота ($f_{кр}$) — это максимальная частота в отсутствие внешней нагрузки. Предельную частоту генерации схемы ($f_{ген}$), которая всегда меньше $f_{кр}$, можно найти, учитывая дополнительное активное сопротивление потерь $r_{вн}$, вносимое этой схемой:

$$f_{ген} = \frac{1}{2\pi C_д |-R_д|} \sqrt{\frac{|-R_д|}{r_д + r_{вн}} - 1}.$$

Выше этой частоты сопротивление диода в схеме уже не может быть отрицательным. Следовательно, при $f > f_{ген}$ нельзя получить усиление или автоколебание, так как при этом диод имеет лишь положительное активное сопротивление и емкость.

Максимальное значение предельной частоты генерации схемы определяется как

$$f_{ген.макс} = \frac{1}{2\pi C_д |-R_д|}.$$

Верхний частотный предел определяется произведением $|-R_д| C_д$. Так как величина дифференциального отрицательного сопротивления диода $|-R_д|$ изменяется от точки к точке на падающем участке вольт-амперной характеристики, то значение частоты $f_{ген\ макс}$ также зависит от положения рабочей точки на этом участке Максимальному значению частоты генерации соответствует $|-R_{д.мин}|$, которое составляет приблизительно 40% от значения интегрального сопротивления $|R'_д|$.

Приравняв нулю мнимую часть выражения для комплексного сопротивления диода, можно определить еще одну характеристическую частоту — резонансную частоту диода $f_{рез}$, при которой равна нулю мнимая часть сопротивления Z:

$$\operatorname{Im}(Z) = \omega L_д - \frac{\omega R_д^2 C_д}{1 + \omega^2 R_д^2 C_д^2} = 0,$$

откуда

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi C_д |-R_д|} \sqrt{\frac{C_д R_д^2}{L_д} - 1}.$$

Для устойчивой работы схемы необходимо, чтобы собственная резонансная частота туннельного диода была выше предельной частоты генерации, т. е. была в том диапазоне частот, где диод уже не имеет отрицательного сопротивления. Это условие выполняется при малых значениях индуктивности диода $L_д$.

Если $f_{рез} \geqslant f_{кр}$ — то диод «потенциально устойчив», если же $f_{рез} \leqslant f_{кр}$ — то диод «потенциально неустойчив», так как в этом случае он генерирует колебания даже при отсутствии внешних реактивных элементов.

При работе на частотах ниже $f_{рез}$ сопротивление диода носит емкостный, а при работе на частотах выше $f_{рез}$ индуктивный характер.

Источники питания

Одним из премуществ схем с туннельными диодами является малое потребление энергии ($\approx 10^{-4}$ *вт*), однако до сих пор это преимущество не используется, так как нет соответствующих источников питания. Обычно такие схемы питают от стандартных элементов с напряжением 1,5—2,2 *в*, в то время как требуемое напряжение не превышает 200 *мв*. Избыток напряжения гасится балластным сопротивлением, за счет чего мощность, потребляемая от источника питания, оказывается равной или больше мощности, необходимой для питания аналогичных схем на транзисторах.

Источник постоянного напряжения для схем с туннельными диодами должен удовлетворять двум основным требованиям: иметь высокую стабильность и малое внутреннее сопротивление.

Относительная нестабильность источника питания для схемы с туннельными диодами должна быть не более

$$\eta_E = \frac{\Delta E}{E} = (0{,}05 \div 0{,}3)\,\%,$$

в то время как у транзисторов допустимая нестабильность составляет 10%. Нестабильность напряжения источника питания приводит к резкому изменению величины отрицательного сопротивления диода, и, как следствие, к нестабильности основных качественных показателей схемы (усилителя или генератора). На рис. 4 приведен график зависимости допустимой нестабильности источника питания η_E от допустимой нестабильности коэффициента усиления η усилителя для двух значений коэффициента усиления по мощности.

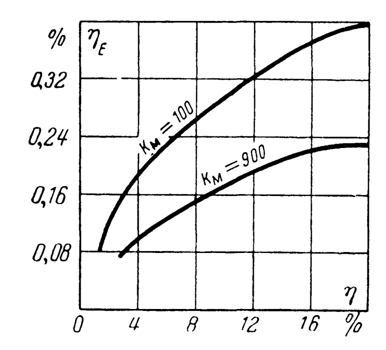


Рис. 4. Зависимость допустимого коэффициента нестабильности источника питания η_E от допустимой нестабильности коэффициента усиления η.

Второе требование возникает из условия устойчивой работы схемы по постоянному току. Линия нагрузки по постоянному току может пересекать вольт-амперную характеристику диода либо в одной, либо в трех точках, в зависимости от величин внутреннего сопротивления источника при одном и том же напряжении в рабочей точке (см. рис. 2). Нагрузочная прямая *В* соответствует режиму, в котором схема работает как переключатель. Рабочая точка *1*—точка неустойчивого равновесия и в зависимости от знака флуктуации напряжения U_0 будет перескакивать в точки устойчивого равновесия *2* или *3*. Это свойство схемы позволяет использовать ее в переключающих устройствах. При этом полное сопротивление цепи постоянному току (рис. 3) больше модуля отрицательного сопротивления туннельного диода, т. е. $r_\Sigma > |-R_д|$, где $r_\Sigma = r_д + r_{вн}$ — полное сопротивление схемы постоянному току.

Если цепи переменного и постоянного тока в схеме разделены, то $r_{вн}=R_г$, где $R_г$ — внутреннее сопротивление источника постоянного смещения. Для того чтобы точка 1 была устойчивой, т. е. чтобы схему можно было использовать в качестве усилителя или генератора гармонических колебаний, необходимо обеспечить наклон нагрузочной прямой, соответствующий прямой A (рис. 2). Такой режим выполняется при условии $r_\Sigma < |-R_д|$. Если это условие не выполняется из-за большого внутреннего сопротивления источника питания, то последний шунтируют малым сопротивлением. Обычно используют делитель R_1 и R_2 (рис. 5), и напряжение на диод подается с резистора R_2, сопротивление которого меньше модуля отрицательного сопротивления диода. При этом должно выполняться неравенство

Рис. 5. Подача напряжения смещения на туннельный диод через делитель.

$$r_\Sigma = R + r_д < |-R_д|,$$

где

$$R = \frac{(R_г + R_1) R_2}{R_г + R_1 + R_2}.$$

Чем меньше R_2, тем больше запас устойчивости, т. е. тем дальше схема от режима переключения, однако уменьшение R_2 требует увеличения мощности источника.

Слишком малое значение сопротивления замкнутого контура по постоянному току r_Σ может вызвать генерирование схемы. Условие устойчивой работы, т. е. условие, при котором в цепи питания не возникнут паразитные колебания, можно получить, рассмотрев предельный случай равенства частот $f_{рез}$ и $f_{кр}$, откуда

$$L_\Sigma < r_\Sigma |-R_д| C_д \text{ или } r_\Sigma > \frac{L_\Sigma}{|-R_д| C_д},$$

где L_Σ — суммарная индуктивность, состоящая из индуктивности диода $L_д$ и индуктивности внешней цепи $L_{вн}$.

Аппроксимация вольт-амперной характеристики диода

Вопрос устойчивости схемы на туннельном диоде обычно рассматривается в предположении, что его характеристика линейна, т. е. воздействующий сигнал мал. Реальная же характеристика диода существенно нелинейна, а амплитуды воздействующих сигналов могут быть значительны. Кроме того, при нестабильном источнике питания рабочая точка может менять свое положение, что приводит к отклонению действительных параметров устройства от рассчитанных. Для оценки нелинейных и перекрестных искажений в схеме важно иметь аналитическое выражение характеристики диода (аппроксимировать ее).

К аппроксимирующей функции предъявляется ряд требований. С одной стороны она должна быть достаточно простой, чтобы решение получилось в удобном для анализа виде. С другой стороны аналитическое выражение должно описывать реальную характеристику с определенной точностью, чтобы результаты анализа можно было применить для расчета конкретных устройств.

В настоящее время не существует простого аналитического выражения для вольт-амперной характеристики туннельного диода, достаточно точно описывающего все процессы, протекающие в узких *p-n* переходах.

Аппроксимация полной вольт-амперной характеристики диода может быть осуществлена несколькими способами. Если рабочая точка находится вблизи максимума тока, что может иметь место в пре-

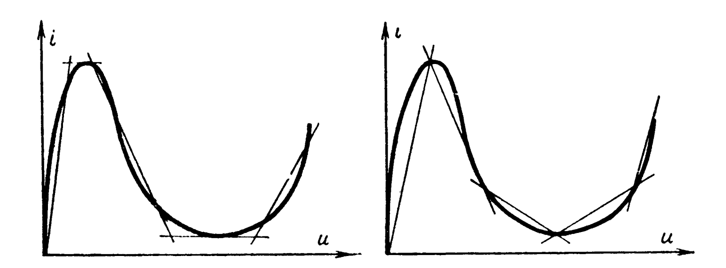


Рис. 6. Аппроксимация отдельных участков вольт-амперной характеристики отрезками прямых различной крутизны.

образователях частоты, то вольт-амперная характеристика в этой области близка к квадратичной параболе.

Достаточно простой является аппроксимация отдельных участков характеристики отрезками прямых различной крутизны (рис. 6). Точность аппроксимации зависит от числа отрезков, но при значительном их увеличении возрастает сложность расчета. Необходимое число отрезков определяется в каждом конкретном случае в зависимости от формы характеристики, требуемой точности расчета и от выбора рабочего участка характеристики.

Чаще всего вольт-амперная характеристика аппроксимируется степенным полиномом. В небольшой окрестности рабочей точки ($\Delta U<0{,}1U_0$) и при небольшом сигнале для оценки нелинейных свойств туннельного диода можно воспользоваться кубическим полиномом:

$$i=au^3+bu^2+cu$$

Для большей точности или при больших сигналах применяются полиномы пятой, восьмой и даже одиннадцатой степени, но это приводит к очень громоздким вычислениям.

Статические характеристики различных типов туннельных диодов можно представить с точностью не хуже $\pm 6\%$ суммой двух экспоненциальных функций:

$$i=aue^{-bu}+d(e^{cu}-1).$$

Первое слагаемое соответствует туннельной, второе — диффузионной составляющей тока; a, b, c и d — коэффициенты, постоянные для каждого экземпляра диода.

Глава вторая

УСИЛИТЕЛИ

Общие сведения

Из всего многообразия применений наиболее перспективно использование туннельных диодов в усилителях ВЧ и СВЧ. Это связано с тем, что такие усилители имеют низкий уровень собственных шумов (2—3 *дб*), простую конструкцию и не требуют дополнительных генераторов накачки. В ряде случаев туннельный диод применяется и для усиления низких частот.

Основными параметрами, характеризующими усилитель с туннельным диодом, являются коэффициент усиления, добротность (произведение коэффициента усиления на полосу пропускания) и коэффициент шума. Усилительные свойства характеризуются коэффициентом усиления по мощности. Однако поскольку туннельный диод является двухполюсником и у него нельзя разделить вход и выход, то использовать для этой цели обычное понятие коэффициента усиления по мощности (как отношение мощности сигнала, выделяемой в нагрузке усилителя, к мощности сигнала, поступающего в его входную цепь) невозможно. Поэтому в литературе встречается иное определение коэффициента усиления по мощности, причем различные авторы пользуются разными определениями.

Чаще всего используют номинальный коэффициент усиления по мощности $K_м$, определяемый как отношение мощности сигнала $P_н$, выделяемой в нагрузке усилителя, к мощности P_0, которую может отдать данный генератор сигнала в согласованную нагрузку. Так как

$$P_н = \frac{U_н^2}{R_н}, \quad P_0 = \frac{U_г^2}{4R_г},$$

то

$$K_м = \frac{P_н}{P_0} = 4\frac{R_г}{R_н}\left(\frac{U_н}{U_г}\right)^2,$$

где $U_г$ и $U_н$ — напряжения генератора и нагрузки, а $R_г$ и $R_н$ — сопротивления источника сигнала и нагрузки соответственно. В конкретной схеме входное сопротивление усилительного элемента может быть не согласовано с внутренним сопротивлением генератора, поэтому номинальный коэффициент усиления характеризует усилительные свойства всей схемы в целом (генератор, усилитель, нагрузка) с учетом потерь на рассогласование.

Иногда усилитель характеризуют коэффициентом вносимого усиления $K_{вн}$, который показывает величину мощности, «вносимой» в схему. Он определяется как отношение мощности сигнала, выделяемой в нагрузке при включенном диоде, к мощности в той же нагрузке при выключенном диоде. Номинальный коэффициент усилений $K_м$ и коэффициент вносимого усиления $K_{вн}$ связаны соотношением:

$$K_м = K_{вн}\frac{4R_гR_н}{(R_г + R_н)^2}.$$

При $R_г = R_н$ $K_м = K_{вн}$, во всех остальных случаях $K_м < K_{вн}$.

3—2729

Коэффициентом усиления по напряжению считают отношение напряжения на выходе усилителя $U_н$ к э. д. с. источника сигнала $U_г$:

$$K_н = \frac{U_н}{U_г}.$$

Обычное определение коэффициента усиления по напряжению как отношение напряжений на выходе и входе усилителя теряет смысл у двухполюсника. Коэффициент усиления по напряжению однозначно связан с коэффициентом усиления по мощности:

$$K_н = \frac{1}{2}\sqrt{K_м \frac{R_н}{R_г}}.$$

Обычно коэффициент усиления выражается в децибелах. Коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах, равен $20\lg K_н$, а коэффициент усиления по мощности — $10\lg K_м$.

Уровень минимально усиливаемого сигнала ограничивается собственными шумами усилителя. Шум, создаваемый туннельным диодом, можно представить в виде трех источников шума: дробового, теплового и мерцательного.

Главным источником шума туннельного диода является дробовой шум. Он создается постоянным током, протекающим через диод при работе усилителя. Дробовой шум имеет сплошной спектр и может быть представлен в виде источника тока $i_{др}$:

$$i^2_{др} = 2eI_0\Delta f,$$

где e — заряд электрона;

Δf — полоса пропускания усилителя на уровне 3 *дб*.

Тепловой шум в паразитном последовательном сопротивлении потерь $r_д$ туннельного диода может быть представлен в виде источника э. д. с. $e_т$:

$$e^2_т = 4kTr_д\Delta f,$$

где $e_т$ — э. д. с. тепловых шумов;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура сопротивления потерь, °K.

Для уменьшения влияния теплового шума необходимо иметь возможно меньшее отношение $r_д/|-R_д|$. Обычно это отношение равно 0,1—0,3.

В диапазоне звуковых частот проявляется также шум, спектральная плотность которого убывает по закону $1/f$. Это так называемый мерцательный шум, связанный с током утечки перехода. На частотах выше 1 *кгц* эта шумовая компонента пренебрежимо мала по сравнению с остальными.

Эвивалентная схема туннельного диода с учетом шумов представлена на рис. 7,*а*. Известно, что дробовой шум дает основной вклад в величину общего шума туннельного диода уже при $r_д/|-R_д| = 0{,}1$—$0{,}3$. Дробовой шум характеризуется шумовой постоянной, приблизительно равной $20I_0|-R_д|$. Количественно шумовые свойства усилителя определяются коэффициентом шума F. Он равен отношению мощности шумов на выходе реального усилителя к мощности шумов на выходе идеального, не вносящего собственных шу-

мов, усилителя. Иначе, коэффициент шума определяет, на сколько усилитель ухудшает отношение сигнал/шум, т. е.

$$F = \frac{(\text{сигнал/шум})_{\text{вх}}}{(\text{сигнал/шум})_{\text{вых}}}.$$

Эквивалентная схема усилителя с учетом шумов представлена на рис. 7,*б*. Коэффициент шума усилителя можно представить в виде

$$F = 1 + \frac{g_1}{g_{\text{г}}} + \frac{g_{\text{н}}}{g_{\text{г}}} + \frac{g_e}{g_{\text{г}}},$$

где g_1 — проводимость собственных потерь диода и контура усилителя;

$g_{\text{н}}$ — проводимость нагрузки;

$g_{\text{г}}$ — проводимость генератора;

g_e — эквивалентная шумовая проводимость диода;

$$g_e = \frac{eI_0}{2kT}.$$

При $T=300°$ К g_e равна $0{,}02 I_0 R_{\text{д}}$, где I_0 измерен в миллиамперах. При слабой связи с нагрузкой выражение для коэффициента шума упрощается:

$$F = 1 + 0{,}02 I_0 R_{\text{д}}.$$

Рис. 7. Эквивалентная шумовая схема туннельного диода и усилителя на туннельном диоде.

Напряжение на диоде, соответствующее минимальному значению коэффициента шума F, не совпадает с тем напряжением, при котором значение отрицательного сопротивления туннельного диода минимально, а превосходит его на 10—20 *мв*.

В широкополосном усилителе коэффициент шума на всех частотах остается ограниченной величиной. Для резонансного усилителя

коэффициент шума неограниченно возрастает при приближении рабочей частоты усилителя к критической ($f_{кр}$).

Для полной характеристики усилителя с туннельным диодом вводят величину M, определяющую как усилительные, так и шумовые свойства схемы.

$$M=\frac{F-1}{1-\frac{1}{K_м}}.$$

Усилитель должен быть рассчитан так, чтобы M имело минимальное значение.

Резистивные усилители низкой частоты

Резистивные усилители могут быть построены по последовательной или по параллельной схеме.

Последовательная схема резистивного усилителя изображена на рис. 8,*а*, где $R_н$ и $C_н$ — сопротивление и емкость нагрузки; $C_р$ — разделительный конденсатор; E, R_1 и R_2 — э. д. с. источника питания и резисторы делителя; $e_г$, $R_г$ и C_0 — э. д. с., внутреннее сопротивление и выходная емкость источника сигнала.

Заменяя туннельный диод его эквивалентной схемой и опуская цепи постоянного тока, переходим к эквивалентной схеме усилителя по переменному току (рис. 8,*б*), где

$$R_п=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}.$$

Коэффициент усиления по напряжению на средних частотах, при которых можно пренебречь влиянием всех емкостей, равен:

$$K_н=\frac{R_{э.н}}{R_г+R_{э.н}-R_д},$$

где

$$R_{э.н}=\frac{R_нR_п}{R_н+R_п}.$$

С точки зрения величины коэффициента усиления безразлично, где на падающем участке характеристики диода выбрана рабочая точка, поскольку подбором сопротивления нагрузки $R_н$ всегда можно обеспечить сколь угодно большой коэффициент усиления. Однако на падающем участке характеристики есть точки, в которых достигается либо минимум нелинейных искажений, либо минимум шума.

Обычно рабочая точка выбирается в точке перегиба падающего участка вольт-амперной характеристики диода, где $|-R_д|=|-R_{д.мин}|$ (точка A на рис. 9). В окрестности точки A величина $R_д$ изменяется значительно меньше, чем в других точках вольт-амперной характеристики. Следовательно, в этой точке нелинейные искажения усиливаемого сигнала минимальны при максимальной полезной мощности. При этом требования к стабильности источника питания наименее жесткие, а произведение полосы пропускания на коэффициент усиления имеет максимальное значение.

Хотя шумы туннельного диода в точке A и не имеют минимума, однако они всего на 5—10% превышают свое минимальное значение.

Коэффициент передачи на средних частотах получается максимальным при сопротивлении нагрузки $R_н$, стремящемся к бесконечности (тогда $R_{э\,н}=R_п$); при этом

$$K_{н.макс} = \frac{R_п}{R_г + R_п - R_д}.$$

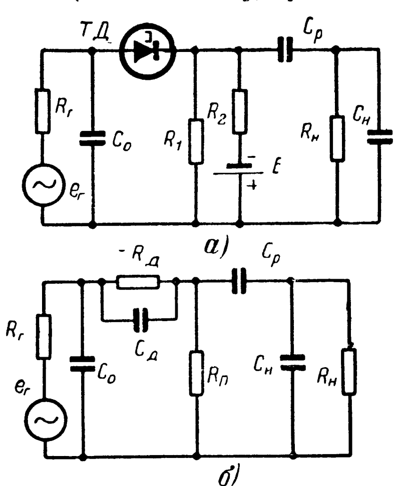


Рис 8. Резистивный усилитель с последовательным включением туннельного диода.

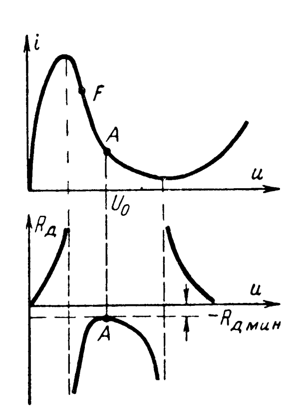


Рис. 9. Характеристики туннельного диода.

Если сумма $(R_г+R_п)$ близка к $|-R_д|$, то коэффициент усиления стремится к бесконечности, но усилитель при этом работает неустойчиво. Для устойчивой работы усилителя необходимо выполнить условие

$$R_г+R_п<|-R_д|,$$

которое может быть записано в виде равенства

$$k_у(R_г+R_п)=|-R_д|,$$

где $k_у$ — коэффициент, определяющий запас устойчивости. Тогда выражение для максимального коэффициента усиления по напряжению примет вид:

$$K_{н.макс} = -\frac{1 - k_у \frac{R_г}{R_д}}{k_у - 1}.$$

Увеличение $k_у$ приводит к увеличению устойчивости схемы, но вместе с тем уменьшает коэффициент усиления усилителя и требует увеличения мощности от источника питания. Рекомендуется выбирать $k_у=1,05\div1,5$. Если отношение $R_г/R_д$ велико, то для получения $K_{н.макс}>1$ нужно выбирать диод с бо́льшим значением $|R_д|$, больше шунтировать его (уменьшая R_1) и смещать рабочую точку в сторону минимума тока вольт-амперной характериетики.

Коэффициент вносимого усиления для последовательной схемы равен:

$$K_{вн}=\left[\frac{R_г+R_н}{R_г+R_н+Z_д}\right]^2.$$

Если пренебречь влиянием $r_д$ и $C_д$, то последнее выражение упрощается и принимает вид:

$$K_{вн}=\left[\frac{R_г+R_н}{R_г+R_н-R_д}\right]^2.$$

Верхняя и нижняя частоты полосы пропускания усилителя определяются по формулам:

$$f_н=\frac{1}{2\pi C_р(R_{эо}+R_н)};$$

$$f_в=\frac{1}{2\pi\tau_э}\sqrt{\sqrt{1+\frac{\tau_э^4}{\tau_1^4K_0^2}}-1},$$

где $\tau_1^2=R_дC_дR_гC_о+R_дC_дC_нR_г+R_гC_оC_нR_д$;

$$R_{эо}=\frac{R_п(R_д-R_г)}{R_д-R_п-R_г};$$

$$\tau_2=\frac{R_гC_о(R_{э.н}-R_д)+C_нR_{э.н}(R_г-R_д)-R_дC_д(R_{э.н}+R_г)}{R_{э.н}};$$

$$\tau_э=\frac{\tau_1^2}{\sqrt{\tau_2^2-2\frac{\tau_1^2}{|K_0|}\left(1-\frac{\tau_2^2}{\tau_1^2}\right)}}.$$

Параллельная схема резистивного усилителя низкой частоты и его эквивалентная схема изображены на рис. 10,*а* и *б*. Источник сигнала, туннельный диод и нагрузка включены параллельно. Коэффициент усиления по напряжению на средних частотах определяется по формуле

$$K_н=\frac{g_г}{g_г+g_{н.э}-g_д},$$

где $g_г=1/R_г$ — внутренняя проводимость источника сигнала; $g_{н.э}=g_н+g_п$; $g_п=1/R_п$; $g_н=1/R_н$; $g_д=1/R_д$.

Максимальное значение $K_н$ получается при $g_н$, стремящейся к нулю:

$$K_{н.макс}=\frac{g_г}{g_г+g_п-g_д}.$$

Для устойчивой работы схемы необходимо выполнить условие:

$$g_г+g_{н.э}>|-g_д|.$$

Учитывая условие устойчивости:

$$g_{г} + g_{п} = \frac{k_{у}}{|-R_{д}|},$$

получаем:

$$K_{н.макс} = \frac{\frac{|-R_{д}|}{R_{г}}}{k_{у} - 1}.$$

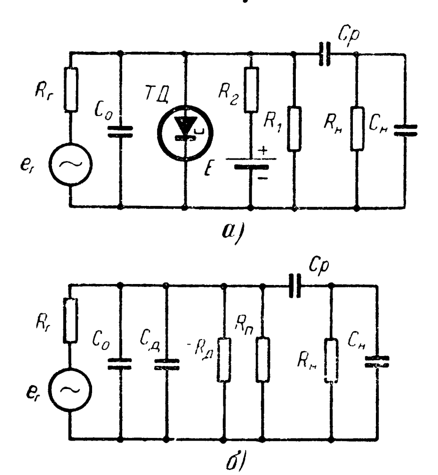


Рис. 10. Резистивный усилитель с параллельным включением туннельного диода.

Верхняя и нижняя частоты полосы пропускания определяются по формулам:

$$f_{в} = \frac{1}{2\pi\tau_{в}}, \quad f_{н} = \frac{1}{2\pi\tau_{н}},$$

где

$$\tau_{в} = \frac{C_{д} + C_{0} + C_{н}}{g_{г} + g_{н.э} - g_{д}}, \quad \tau_{н} = C_{р}\left(R_{н} + \frac{|-R_{д}|}{g_{г}|-R_{д}| + g_{н}|-R_{д}| - 1}\right).$$

Коэффициент вносимого усиления:

$$K_{вн} = \frac{\frac{1}{R}}{\left[\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_{д}}\right]^{2}},$$

где

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{г}} + \frac{1}{R_{н}}.$$

На рис. 11 приведена схема параллельного резистивного усилителя с разделением цепей постоянного и переменного тока. Смещение на диод подается с помощью делителя напряжения, состоящего из резисторов R_1 и R_2. Разделение цепей переменного и постоянного тока осуществляется с помощью катушки индуктивности L, включенной параллельно нагрузке. Так как сопротивление катушки постоянному току мало, а переменному — велико, то постоянная составляющая тока идет через катушку, а переменная — через нагрузку. Такое включение индуктивности L не снижает коэффициента усиления схемы по переменному току.

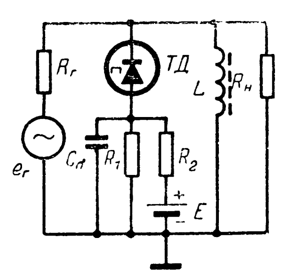


Рис. 11. Резистивный усилитель с разделением цепей переменного и постоянного тока.

Для того чтобы избежать возможности работы схемы в режиме переключения, необходимо, чтобы общее сопротивление замкнутого контура по постоянному току было меньше, чем отрицательное сопротивление диода, т. е.:

$$R + R_{инд} < |-R_д|,$$

где

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$R_{инд}$ — сопротивление катушки индуктивности L постоянному току. Очень малое полное сопротивление замкнутого контура может вызвать генерирование схемы. Для получения стабильного усиления необходимо выполнить условие

$$\frac{L_\Sigma}{R_д C_д} < R_т < |-R_д|,$$

где $R_т = R + R_{инд}$.

Обычно для стабильного усиления используют значения $R_т = (0{,}3 \div 0{,}6) R_д$.

В заключение сравним некоторые параметры резистивных усилителей с последовательным и параллельным включением диода и рассмотрим требования, предъявляемые к ним. Усилитель с последовательным включением диода и нагрузки имеет несколько бóльшую верхнюю частоту полосы пропускания ($f_в$), чем с параллельным включением; он более эффективен при чередовании с транзисторными каскадами.

Основным недостатком усилителя с параллельным включением диода является то, что он утрачивает усилительные свойства при разделении цепей источника сигнала и нагрузки по постоянному току. Обе схемы дают возможность непосредственного подключения нагрузки к усилителю, при этом он превращается в усилитель постоянного тока.

Относительное изменение коэффициента усиления под влиянием разброса параметров диода и изменения температуры для обеих схем увеличивается с увеличением коэффициента усиления. Наи-

меньшая нестабильность достигается при равенстве нулю отношения $R_г/R_н$. Но величины $R_г$ и $R_н$ ограничены неравенствами:

$R_г + R_н \leqslant |-R_д|$ — для последовательной схемы;

$\frac{R_г R_н}{R_г + R_н} \leqslant |-R_д|$ — для параллельной схемы,

поэтому при работе с низкоомным генератором сигнала целесообразнее применять последовательный усилитель, а с высокоомным — параллельный.

При прочих равных условиях параллельный усилитель обладает меньшей нестабильностью коэффициента усиления по сравнению с последовательным. При этом нестабильность параллельного усилителя не зависит от способа включения источника постоянного смещения.

Обычные ламповые и полупроводниковые усилители при допустимой нестабильности коэффициента усиления 10—30% не требуют применения прецизионных резисторов. Усилители же с туннельными диодами при тех же условиях и сравнительно небольшом усилении (2—8 на каскад) требуют применения резисторов с достаточно малым разбросом. Этим требованиям удовлетворяют резисторы типа УЛИ и БЛП, имеющие разброс ±1 и ±0,5% соответственно.

Для устойчивой работы усилителя необходимо тщательно продумать его конструкцию. Выводы диода и соединительные провода должны быть как можно короче, так как с их удлинением увеличивается эквивалентная индуктивность диода, а следовательно, понижается резонансная частота диода. С понижением резонансной частоты может возникнуть генерация, если $f_{рез}$ станет меньше $f_{кр}$.

Сумма проводимостей нагрузки и генератора для параллельной схемы должна всегда быть больше отрицательной проводимости диода, т. е. $g_н + g_г > |-g_д|$, а для последовательной схемы $R_г + R_н < |-R_д|$.

Полная проводимость замкнутого для постоянного тока контура должна быть больше, чем отрицательная проводимость диода (источник постоянного смещения должен быть источником напряжения). Все рассмотренные выше требования должны выполняться при всех температурах и всех напряжениях источника питания.

Резонансные усилители высокой частоты

Принцип действия резонансного усилителя высокой частоты на туннельном диоде основан на частичной компенсации потерь в контуре за счет отрицательного сопротивления диода $-R_д$. Однако значительное увеличение добротности контура может привести к генерации, для устранения которой необходимо принимать специальные меры. Усилитель высокой частоты может быть выполнен по последовательной или параллельной схемам.

В параллельной схеме резонансного усилителя (рис. 12) емкость диода, включенная параллельно отрицательной проводимости, по мере повышения частоты увеличивает шунтирующее действие. В усилителе с параллельным контуром параллельно диоду включается катушка индуктивности $L_к$ и конденсатор $C_к$ с таким расчетом, чтобы на рабочей частоте f_0 суммарная емкость $C = C_к + C_д$ и индуктивность резонировали $\left(f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_к C}} \right)$.

Выражение для коэффициента усиления по мощности в общем случае выглядит следующим образом:

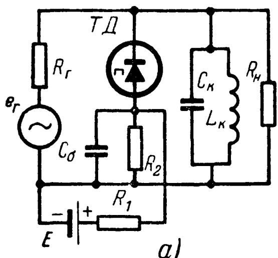
$$K_м = \frac{4g_г g_н}{g_э^2 + \omega^2 C^2 \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)^2}.$$

При резонансе ($\omega = \omega_0$) коэффициент усиления по мощности имеет максимальное значение:

$$K_{м.макс} = \frac{4g_г g_н}{g_э^2},$$

где $g_э = (g_г + g_к + g_н - g_д)$; $g_к$ — эквивалентная проводимость контура на рабочей частоте.

Если сумма положительных проводимостей $(g_г + g_к + g_н)$ выбрана равной отрицательной проводимости $(-g_д)$, то коэффициент усиления $K_м$ бесконечно большой. Если сумма $(g_к + g_н + g_г)$ меньше $|-g_д|$, то схема неустойчива. Таким образом, для получения устойчивого усиления следует делать сумму $(g_г + g_к + g_н)$ несколько больше, чем $|-g_д|$. При удалении от резонанса усиление уменьшается.



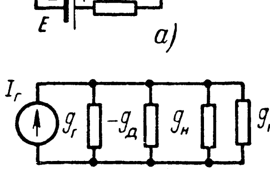


Рис. 12. Резонансный усилитель высокой частоты с параллельным включением диода.

Полоса пропускания усилителя по уровню 0,7 определяется выражением

$$\Delta f_{0,7} = \frac{g_э}{2\pi C}.$$

Последние два уравнения показывают, что с увеличением коэффициента усиления (путем уменьшения $g_н$) полоса пропускания сокращается, обращаясь в нуль в точке, где $g_э$ равно нулю, т. е. там, где усиление бесконечно.

Добротность усилителя на туннельном диоде, равная произведению коэффициента усиления по напряжению на полосу пропускания можно выразить через параметры схемы:

$$S = \sqrt{K_м}\,\Delta f = \frac{\sqrt{g_г g_н}}{\pi C}.$$

Произведение полосы пропускания на коэффициент усиления будет наибольшим, когда $g_н = g_г = |-g_д|/2$, при этом

$$\sqrt{K_м}\,\Delta f = \frac{g_н}{\pi C} = \frac{|-g_д|}{2\pi C}.$$

Таким образом, качество туннельного диода определяется отношением его параметров $|-g_д|/C_д$, так как при $C_к = 0$ $C = C_д$. Добротность туннельного диода значительно превышает добротность электронных ламп и транзисторов.

Коэффициент вносимого усиления усилителя определяется по формуле

$$K_{вн}=\left[\frac{1}{1-\frac{R}{R_д}\left[1-\left(\frac{\omega_р}{\omega_{кр}}\right)^2\right]}\right]^2,$$

где $\frac{1}{R}=\frac{1}{R_г}+\frac{1}{R_н}$;

$\omega_р$ — резонансная частота усилителя;

$\omega_{кр}$ — критическая частота туннельного диода.

При увеличении входного сигнала наблюдается значительное уменьшение коэффициента усиления, так как характеристика туннельного диода не является линейной и с увеличением входного сигнала увеличивается отрицательное сопротивление.

Характеристики усилителя в значительной степени зависят от стабильности температуры окружающей среды и напряжения источника смещения. Нестабильность температуры и смещения особенно резко проявляется при большом усилении. Так, например, в последовательном усилителе, настроенном на частоту 3,5 *Мгц* и имеющем усиление 35 *дб*, изменение смещения на 5 *мв* приводит к уменьшению усиления на 10—15 *дб*. Поэтому стабильная работа усилителя возможна лишь при усилении 10—20 *дб*. Одной из причин неустойчивой работы является неправильное проектирование схемы питания. Включать источник питания непосредственно в высокочастотный контур не рекомендуется. Для разделения высокочастотных цепей и цепей питания ставят блокировочный конденсатор $C_б$ (рис. 12).

На устойчивость работы усилителя оказывают влияние изменения сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника сигнала. Любое небольшое изменение отрицательной проводимости диода $|g_д|$, вызванное изменением смещения, сменой диода, колебаниями температуры или изменением проводимости нагрузки или источника питания, резко влияет на величину коэффициента усиления. Источником сигнала в усилителе обычно бывает антенна, а нагрузкой — преобразователь частоты. Их сопротивления могут меняться во времени при изменении температуры и напряжения питания. По мере возрастания коэффициента усиления требования, предъявляемые к стабильности параметров усилителя, резко повышаются. Так, например, если в усилителе $g_0=g_н$ и $K_м=30$ *дб*, то изменение проводимости нагрузки на 1% вызывает изменение коэффициента усиления при резонансе на 30%.

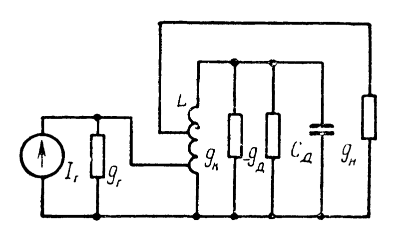


Рис. 13. Резонансный усилитель высокой частоты с согласованием входных и выходных цепей.

Чтобы ослабить влияние изменения сопротивлений источника сигнала и нагрузки на усилитель, необходимо включить согласующие цепи между антенной и усилителем и между усилителем и нагрузкой. На рис. 13 изображена эквивалентная схема резонансного усилителя с согласованием входных и выходных цепей. Включение

источника сигнала и нагрузки может быть автотрансформаторным или трансформаторным; определение коэффициентов трансформации одинаково в обоих случаях. Основные параметры такого усилителя следующие:

коэффициент усиления по мощности:

$$K_{м} = \frac{4g_{г}m_1^2 g_{н}m_2^2}{(g_{г}m_1^2 + g_{н}m_2^2 + g_{к} - g_{д})^2},$$

где m_1 и m_2 — коэффициенты трансформации;

полоса пропускания:

$$\Delta f = \frac{g_{г}m_1^2 + g_{н}m_2^2 + g_{к} - g_{д}}{2\pi C_{д}};$$

добротность контура:

$$Q = \frac{\omega_0 C_{д}}{g_{г}m_1^2 + g_{н}m_2^2 + g_{к} - g_{д}};$$

значения оптимальных коэффициентов трансформации:

$$m_1^2 = \frac{2\pi C_{д}\Delta f - g_{к} + g_{д}}{2\pi g_{г}};$$

$$m_2^2 = \frac{2\pi C_{д}\Delta f - g_{к} + g_{д}}{2\pi g_{н}}.$$

Если коэффициенты трансформации выбраны оптимальными, то максимальный коэффициент усиления по мощности равен:

$$K_{м.макс} = \left(1 - \frac{g_{к} - g_{д}}{2\pi C_{д}\Delta f}\right)^2.$$

Чем у́же полоса пропускания Δf, меньше емкость диода $C_{д}$ и больше отрицательная проводимость диода, тем больше усиление схемы.

Последовательная схема резонансного усилителя изображена на рис. 14. На ней последовательно с туннельным диодом включена индуктивность L, выбранная таким образом, что на рабочей частоте $\omega_{р}$ для последовательного контура, образованного емкостью диода $C_{д}$ и индуктивностью L, выполняется условие резонанса:

$$\omega_{р}L - \frac{\omega_{р}R_{д}^2 C_{д}}{1 + (\omega_{р}R_{д}C_{д})^2} = 0.$$

Усилитель работает устойчиво при выполнении условия

$$L < r_{\Sigma}|-R_{д}|C_{д} \text{ и } r_{\Sigma} < |-R_{д}|.$$

Коэффициент вносимого усиления на частоте $\omega_{р}$ определяется по формуле:

$$K_{вн} = \left\{\frac{1}{1 + \frac{1}{r_{\Sigma}}\left[r_{д} - \frac{R_{д}}{1 + (\omega_{р}R_{д}C_{д})^2}\right]}\right\}^2,$$

где r_{Σ} — суммарное сопротивление постоянному току.

На рис. 15,*а* приведена практическая схема последовательного резонансного усилителя, работающего на частоте 100 *Мгц* с использованием германиевого туннельного диода типа 1N2939 с параметрами: $|R_д| = 143$ *ом*, $C_д = 5$ *пф*, $r_д = 2$ *ом*.

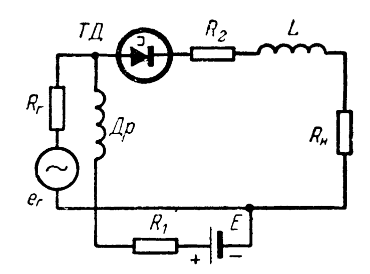


Рис. 14. Резонансный усилитель высокой частоты с последовательным включением диода.

Нагрузка и генератор подключены к схеме при помощи линий сопротивлением 50 *ом*, согласованных на концах. Согласование является необходимым условием нормальной работы усилителя, так как при этом со стороны нагрузки и генератора не вносится никаких реактивных параметров. Индуктивность L_1 и емкость диода $C_д$ образуют колебательный контур, настроенный на частоту 100 *Мгц*. Индуктивность L_2 выполняет функции дросселя, развязывающего цепь постоянного смещения от схемы усилителя.

Сопротивления резисторов R_1 и R_2 подбираются так, чтобы падение напряжения на диоде было равно 125 *мв*. В этой схеме был получен коэффициент усиления 32 *дб*.

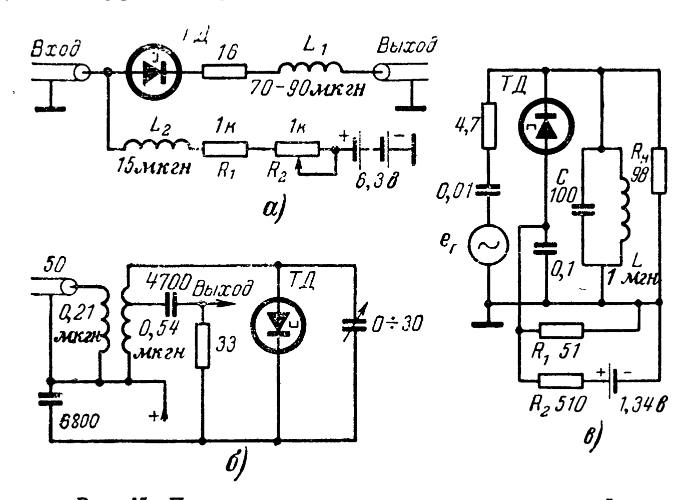


Рис. 15. Практические схемы резонансных усилителей.

Если известны параметры туннельного диода, внутреннее сопротивление генератора, нагрузка, рабочая частота и полоса усиливаемых частот и требуется выбрать тип схемы, позволяющей получить наибольший коэффициент усиления, то основным критерием выбора схемы является соответствие заданных параметров условиям устойчивой работы. Если условия устойчивости выполняются для обеих схем включения диода, то вопрос о выборе схемы решается сравнением коэффициентов усиления.

На рис. 15,*в* и *б* приведены практические схемы параллельных резонансных усилителей на частоты 445 *кгц* и 27 *Мгц* соответственно. В усилителе на 27 *Мгц* применен туннельный диод с параметрами $C_д=25$ *пф*, $r_д=1,2$ *ом*. При коэффициенте усиления 10 *дб* была получена полоса пропускания 1 *Мгц* и коэффициент шума 3,2 *дб*. В усилителе на 445 *кгц* использовался туннельный диод с $|R_д|=100$ *ом* и получено усиление 20 *дб*.

Сверхрегенеративный усилитель

Сверхрегенератор представляет собой систему, в которой эквивалентное затухание контура периодически изменяется с некоторой вспомогательной частотой, становясь то положительным, то отрицательным. Одно из основных преимуществ сверхрегенеративного метода усиления заключается в возможности получить весьма большое усиление от одного каскада. В последнее время сверхрегенерация как средство получения большого усиления от одного каскада применялась в параметрических и квантовых усилителях.

Туннельный диод тоже может быть использован в качестве активного элемента простого сверхрегенеративного усилителя. Усилитель на туннельном диоде может быть превращен в сверхрегенеративный, если напряжение положительного смещения на диоде будет периодически изменяться во времени с определенной частотой.

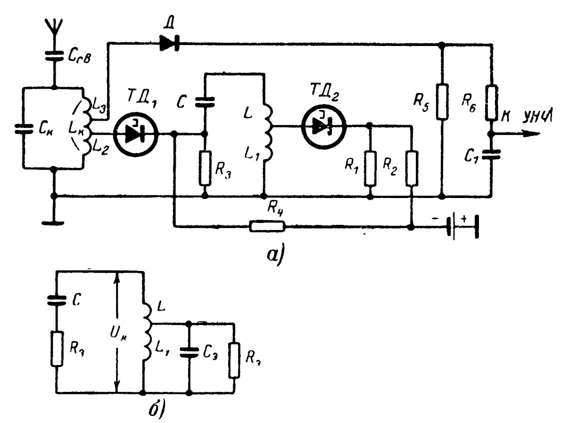


Рис. 16. Сверхрегенеративный усилитель.
а — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема генератора вспомогательной частоты.

Сверхгенератор отличается простотой схемы и конструкции, малыми габаритами, способностью работать на весьма высоких частотах в широком интервале температур.

Сверхрегенеративные усилители могут быть выполнены с отдельным генератором вспомогательных колебаний (который может быть и на туннельном диоде) и на одном туннельном диоде с целью максимального упрощения схемы. Однако в последнем случае качественные показатели усилителя оказываются довольно низкими

(большие нелинейные искажения, низкая стабильность параметров и др.).

На рис. 16,*а* представлена схема сверхрегенеративного усилителя с отдельным генератором вспомогательных колебаний, собранным на диоде *ТД*$_2$. Частота генератора выбирается относительно низкой. Для получения наибольшей мощности от генератора необходимо рабочую точку выбирать на середине падающего участка вольт-амперной характеристики (точка *1* на рис. 2). При этом нужно соблюдать условие устойчивости по постоянному току: $R_1<|R_д|$. В целях экономии энергии источника питания рекомендуется выбирать $R_1=(0{,}8\div0{,}9)|-R_д|$.

Эквивалентная схема генератора приведена на рис. 16,*б*.

Левая часть схемы, собранная на диоде *ТД*$_1$, служит усилителем. Для этой части схемы рабочая точка по постоянному току для уменьшения требующегося гасящего напряжения выбирается вблизи падающего участка вольт-амперной характеристики (справа или слева — принципиально безразлично). При выборе рабочей точки слева (вблизи точки P_1 на рис. 2) диод потребляет меньшую мощность от источника питания.

Высокочастотные колебания, усиленные сверхрегенеративным усилителем, детектируются обычным диодом *Д*.

Усредняющий фильтр R_6C_1 должен пропускать без искажений высшую частоту модуляции. Емкость фильтра C_1 нужно брать относительно небольшой, чтобы не шунтировать вход усилителя низкой частоты на высшей частоте модуляции.

Применение сверхрегенеративных усилителей на туннельных диодах на частотах ниже 100—200 *Мгц* нецелесообразно, так как в этом диапазоне частот из-за высокого уровня помех не удается добиться большого усиления.

Сверхрегенеративный усилитель на диоде типа ЗИ301А, работающий на частоте 600 *Мгц* при частоте вспомогательных колебаний 55 *кгц*, имеет коэффициент усиления по напряжению $6\cdot10^3$, чувствительность 5 *мкв* и полосу пропускания 8 *Мгц*. Другой сверхрегенеративный усилитель на частоте 325 *Мгц* имеет усиление 54 *дб* при чувствительности 0,4 *мкв* и вспомогательной частоте 50 *кгц*.

Усилители промежуточной частоты (УПЧ)

Радиоприемные устройства должны иметь достаточную избирательность, необходимое усиление и наименьший коэффициент шума. Для получения минимального коэффициента шума в составе приемника предусматривается резонансный усилитель высокой частоты, избирательность же и основное усиление достигается с помощью усилителя промежуточной частоты. Для получения значительного усиления усилитель промежуточной частоты должен быть многокаскадным и, кроме того, должен иметь в своем составе элементы с высокими избирательными свойствами.

Одноконтурная система мало пригодна для достижения высокой избирательности из-за неблагоприятной формы резонансной кривой. Для расширения полосы пропускания и улучшения коэффициента прямоугольности резонансный контур часто заменяют полосовым фильтром. Наиболее простыми усилителями такого типа являются

усилители с двумя связанными контурами. Связь между контурами может быть или внешне емкостной (рис. 17,*а*) или трансформаторной (рис. 17,*б*).

Если схема усилителя имеет более двух связанных контуров, то включать туннельные диоды в каждый из них для уменьшения за-

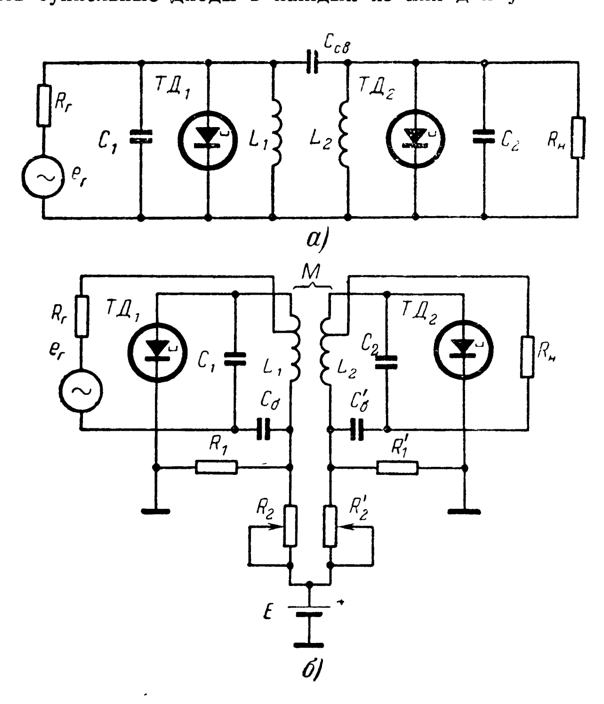


Рис. 17. Усилители промежуточной частоты с полосовыми фильтрами.

тухания не имеет смысла, так как они не нагружены и обладают заведомо высокой добротностью. Нужно уменьшить затухание (посредством включения диодов) только внешних контуров, которые сильно шунтируются источником сигнала (смесителем) и нагрузкой (детектором).

Оба контура (L_1C_1 и L_2C_2) усилителя, изображенного на рис. 17,*а*, настроены на промежуточную частоту $f_{пр}$. Применение двухконтурных усилителей вместо резонансных позволяет получить определенный выигрыш в усилении. Коэффициент усиления по мощности настроенного полосового фильтра с туннельными диодами равен:

$$K_м = \frac{4 g_г g_н}{\left[\frac{(g_к + g_г - g_д)(g_н + g_к - g_д)}{\omega C_{св}} + \omega C_{св}\right]^2},$$

где $g_н$, $g_к$, $g_г$ — проводимости нагрузки, контура и генератора сигнала соответственно;

$C_{св}$ — емкость конденсатора связи.

Если заданы проводимость генератора $g_г$ и параметры фильтра ($g_к$, $C_{св}$), то можно определить оптимальную проводимость нагрузки $g_{н.о}$, при которой получается максимальное усиление:

$$g_{н.о}=\frac{(g_г+g_к-g_д)(g_к-g_д)+(\omega C_{св})^2}{g_г+g_к-g_д};$$

при этом

$$K_{м.макс}=\frac{g_г\omega C_{св}}{g_г+g_к-g_д}\,\frac{1}{\frac{(g_г+g_к-g_д)(g_г-g_д)}{\omega C_{св}}+\omega C_{св}}.$$

В большинстве случаев нагрузка задана, а требуется определить емкость конденсатора связи $C_{св}$. Оптимальная емкость конденсатора связи равна:

$$C_{св.о}=\frac{\sqrt{(g_г+g_к-g_д)(g_н+g_к-g_д)}}{\omega},$$

при этом

$$K_{м.макс}=\frac{g_г g_н}{(g_г+g_к-g_д)(g_н+g_к-g_д)}.$$

Если емкость конденсатора связи выбрана оптимальной и $g_н=g_г$, то связь получается критической, т. е. форма резонансной кривой близка к прямоугольной и имеет уплощенную вершину.

Недостатком двухконтурного усилителя по сравнению с одноконтурным является более высокий уровень внутренних шумов, создаваемых двумя диодами.

Требование большого усиления приводит к необходимости построения многокаскадных усилителей. В активных четырехполюсниках (лампа, транзистор) вход более или менее хорошо отделен от выхода, что дает возможность построения многокаскадных схем. Туннельный диод является двухполюсником, у которого вход и выход полностью связаны. Эта прямая связь требует применения специальных элементов, развязывающих входные и выходные цепи многокаскадных усилителей. Часто в качестве такого элемента используют транзистор, включенный по схеме с общей базой (рис. 18).

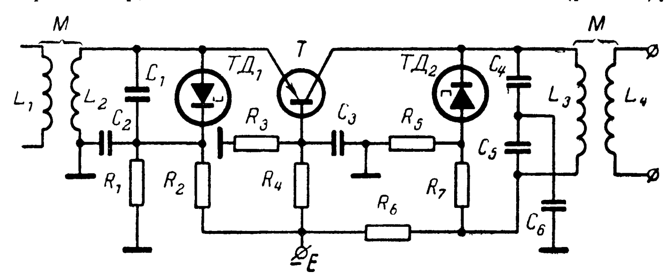


Рис. 18. Использование транзистора для развязки входной и выходной цепей полосового усилителя на туннельном диоде.

На рис. 19,*а* приведена схема одного каскада усилителя промежуточной частоты. Эта схема отличается от обычного усилителя тем, что в ней имеется два диода. Включение диода $ТД_2$ не увеличивает коэффициента усиления, но дает возможность каскадирования. Катушки L_1 и L_2 служат для разделения цепей по переменному и постоянному току. Входное сопротивление каскадированного усилителя равно:

$$R_{вх} = \frac{-R_{д2}(R_н - R_{д1})}{R_н - R_{д1} - R_{д2}}.$$

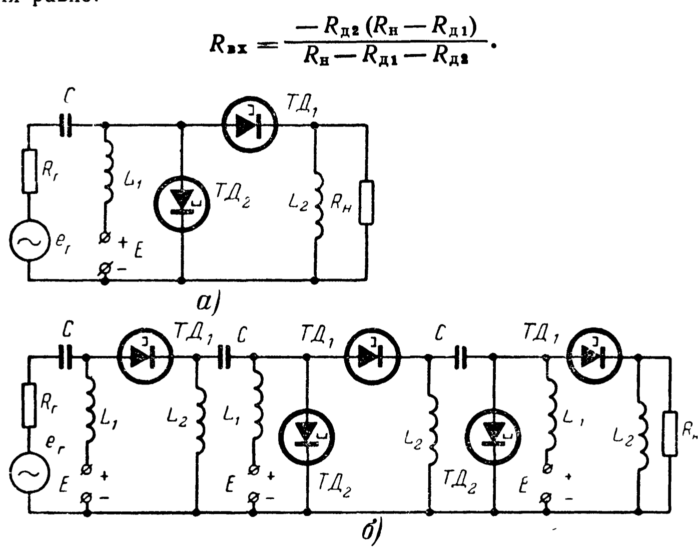


Рис. 19. Каскадированный усилитель промежуточной частоты.
а — **схема одного звена;** *б* — **полная принципиальная схема.**

Если подобрать отрицательное сопротивление диода $ТД_2$ таким, чтобы входное сопротивление каскада равнялось сопротивлению нагрузки, то эту схему можно использовать в качестве нагрузки подобной же цепи. Несколько каскадов, соединенных подобным образом (рис. 19,*б*), дают общее усиление:

$$K_{общ} = K_1 K^n,$$

где n — число каскадов;

$$K_1 = \frac{R_н}{2R_н - R_{д1}} \text{ — усиление первого каскада;}$$

$$K = \frac{R_н}{R_н - R_{д1}} \text{ — усиление каждого последующего каскада.}$$

При этом внутреннее сопротивление источника сигнала также равно $R_н$. Практически такую схему можно осуществить только на относительно высоких частотах (порядка 500 *Мгц*).

Еще один тип схемы для согласования усилителей с использо-

ванием четвертьволновой линии в качестве согласующего элемента показан на рис. 20. Экспериментальный усилитель, построенный по такому принципу, работающий на частоте 30 *Мгц*, имеет сопротивление нагрузки и источника сигнала 50 *ом*, коэффициент шума 4,3 *дб* и усиление 8,9 *дб*. Согласование сопротивления нагрузки и источника с сопротивлением туннельного диода осуществляется с помощью трансформаторов $Тр_1$ и $Тр_2$. Четвертьволновая линия образована элементами L_1C_1. Параллельно диодам включены корректи-

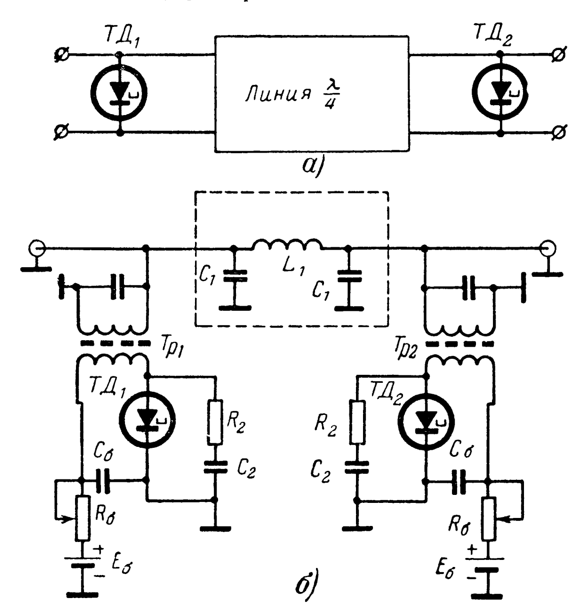


Рис. 20. Усилитель промежуточной частоты с четвертьволновой линией.

а — блок-схема согласованного усилителя; *б* — схема экспериментального усилителя на 30 *Мгц*.

рующие цепочки R_2C_2. Недостатком схемы является наличие пиков на характеристике коэффициента усиления на частотах выше и ниже 30 *Мгц*.

Усилители дециметрового и сантиметрового диапазонов

Возможны два типа параллельных усилителей СВЧ, отличающиеся местом включения туннельного диода — проходная схема усиления, когда диод включен в линию между нагрузкой и источником, и отражательная схема, когда диод включен после нагрузки. Иногда в диапазоне СВЧ применяются усилители с туннельными диодами, непосредственно подключенными на вход приемного устройства, как это показано на рис. 21,*а*. Такие усилители называются работающими «на проход», так как усиливаемый сигнал проходит со входа усилителя на его выход. Усилители с непосредственным включением обладают существенным недостатком, заключающимся в том, что тепловые шумы нагрузки (в данном случае приемника) могут попа-

дать в усилитель и возвращаться в нагрузку усиленными. Кроме того, такой усилитель трудно стабилизировать, так как малое изменение нагрузки приводит к большому изменению усиления. Вот почему непосредственное подключение усилителя к приемнику применяется редко.

Целесообразно подключать нагрузку через устройство, обладающее однонаправленным действием (невзаимное устройство). Такое

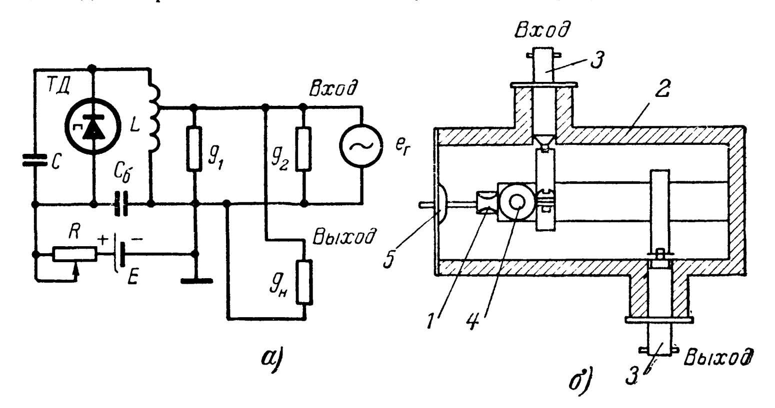


Рис. 21. Резонансный усилитель параллельного типа, работающий «на проход».

устройство должно пропускать усиленный сигнал к нагрузке, но препятствовать проникновению шумов нагрузки в усилитель. В диапазоне СВЧ в качестве таких элементов применяются ферритовые циркуляторы и гибридные соединения. Они просты, малогабаритны и потребляют малую мощность.

Описанная в одном из зарубежных журналов конструкция усилителя на частоту 460 *Мгц* приведена на рис. 21,*б*. Туннельный диод *1* ($|R_д|=100$ *ом*, $C_д=7$ *пф*, $r_д=1$ *ом*; $L_д=6\cdot10^{-9}$ *гн*) находится в полосковом резонаторе *2*, который соединен с генератором и нагрузкой при помощи коаксиальных линий *3*. В резонаторе имеется согласующий стержень *4*. Параллельно диоду подключена коаксиальная емкость *5* для перестройки резонатора. Усилитель работает в диапазоне частот 405—460 *Мгц* с коэффициентом усиления 15 *дб*, коэффициентом шума 5,5 *дб* и полосой пропускания 12 *Мгц*. Размеры усилителя с источником питания 48×29×16 *мм*, вес 100 *г*.

Усилитель с циркулятором рис. 22,*а* является наиболее распространенным видом усилителя. Ферритовый циркулятор является трехплечевым пассивным невзаимным прибором, в котором подлежащий усилению сигнал под действием сильного магнитного поля распространяется лишь в одном направлении: от генератора (полюсы *1—1*) к усилителю (полюсы *2—2*), не попадая в нагрузку. Усиленный сигнал подается в нагрузку (полюсы *3—3*), не попадая при этом на генератор. Подобная циркуляция (по часовой стрелке) получается при подаче сигнала на любой из трех полюсов. В обратном направлении энергия не распространяется. Потери в прямом направлении в циркуляторе составляют доли децибела, развязка в обратном направлении 20 *дб*.

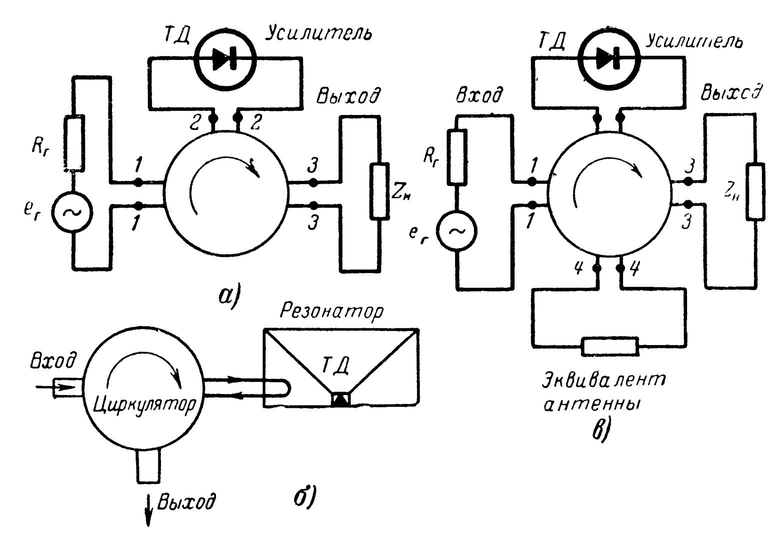


Рис. 22. Усилители СВЧ с ферритовыми циркуляторами.

Усилитель с трехплечевым циркулятором, работающий на частотах 7, 11 и 26 *Ггц*, показан на рис. 22,*б*. Туннельный диод из арсенида галлия ($I_1=0{,}5\div1$ *ма*, $I_1/I_2>3$) помещен в центре цилиндрического резонатора, имеющего в сечении форму конуса. Резонатор работает на отражение и поэтому имеет только один вход в виде петли связи, с помощью которой в резонатор вводится сигнал с генератора и выводится усиленный отраженный сигнал, поступающий в нагрузку. Нагрузка и генератор разделены циркулятором.

Положение петли связи в резонаторе регулируется с помощью согласующего винта, что позволяет изменять коэффициент усиления от 5 до 38 *дб*. На частотах от 6,8 до 25,8 *Ггц* получено усиление 36—38 *дб* при коэффициенте шума 7,5—11,5 *дб*. На частоте 10,8 *Ггц* при усилении 20 *дб* была получена полоса пропускания 20 *Мгц*, а при усилении 10 *дб* — 110 *Мгц*.

Для улучшения развязки в обратном направлении используют четырехплечевые циркуляторы (рис. 22,*в*). Конструкция четырехплечевого циркулятора изображена на рис. 23. Циркулятор содержит ферритовый стержень *5* с конусообразными переходами на концах для согласования. Постоянный магнит *6* создает продольное магнитное поле для поворота плоскости поляризации на 45°. Вертикально поляризованная волна поступает в плечо *1*. Проходя через волновод с намагниченным ферритом, она получает поворот плоскости поляризации на 45° и выходит через плечо *2* к усилителю с туннельным диодом. Отраженная от усилителя волна после вторичного прохождения через намагниченный феррит оказывается горизонтально поляризованной и попадает в плечо *3*. Волна, поступающая в плечо *3*, за счет поворота плоскости поляризации выходит через плечо *4* и т. д.

Усилители с циркуляторами часто называют работающими «на отражение», так как в них существуют две волны: падающая, подлежащая усилению, и отраженная усиленная. Применение циркуля-

торов наиболее целесообразно в сантиметровом диапазоне, где их размеры малы. В диапазоне дециметровых и тем более метровых волн размеры ферритовых циркуляторов чрезмерно велики, что, как правило, не позволяет применять их.

При выборе циркулятора необходимо учитывать, что он должен иметь минимальное значение коэффициента стоячей волны по напряжению, чтобы обеспечить согласование с отрицательной проводимостью туннельного диода; вносимые потери должны быть малы, так как их увеличение способствует увеличению коэффициента шума

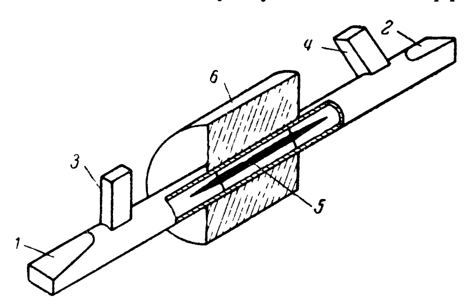


Рис. 23. Конструкция ферритового циркулятора.

вне зависимости от коэффициента усиления системы; циркулятор должен хорошо развязывать диод от источника сигнала и нагрузки; полоса пропускания циркулятора должна быть достаточной для нормальной работы системы в целом. Узкополосные циркуляторы имеют полосу 5—10% от несущей частоты, а широкополосные 20% и выше.

Туннельный диод выбирается по величине отрицательного сопротивления и по минимальному значению емкости диода, так как она влияет на полосу пропускания и рабочую частоту усилителя. Поскольку емкость диода $C_д$ определяет максимальную частоту генерирования, то она определяет и коэффициент шума.

Критическая частота должна быть, по крайней мере, в три раза выше рабочей частоты. Для уменьшения коэффициента шума следует выбирать наименьшее значение отношений $r_д/|-R_д|$ и $I_0/|-g_д|$. Для устойчивого усиления следует выбирать диод с малой индуктивностью корпуса и выполнить условия устойчивости по постоянному и переменному току, аналогичные для усилителей с сосредоточенными постоянными.

Другим методом, позволяющим осуществить направленную передачу сигнала, является метод гибридных волноводных соединений. Блок-схема усилителя, использующего такое соединение, показана на рис. 24. Основным элементом этой схемы является гибридное кольцо, выполненное в виде коаксиальной линии или волновода. К различным точкам гибридного кольца подключены генератор, нагрузка и два усилителя. Расстояния между отдельными плечами обеспечивают такие фазовые соотношения в схеме, что сигналы, отраженные от усилителей, приходят к генератору в противофазе и не воздействуют на него, к нагрузке же они приходят в фазе и складываются. В результате усилитель обладает направленностью. Эта схема весьма чувствительна к рассогласованию в цепях нагрузки

и генератора, поэтому для устойчивой работы приходится использовать дополнительные согласующие элементы. По данным зарубежной литературы усилитель с гибридным соединением на германиевом туннельном диоде типа ZJ56 или GeIN2939 ($|R_д|=115$ *ом*, $I_1=1{,}1$ *ма*,

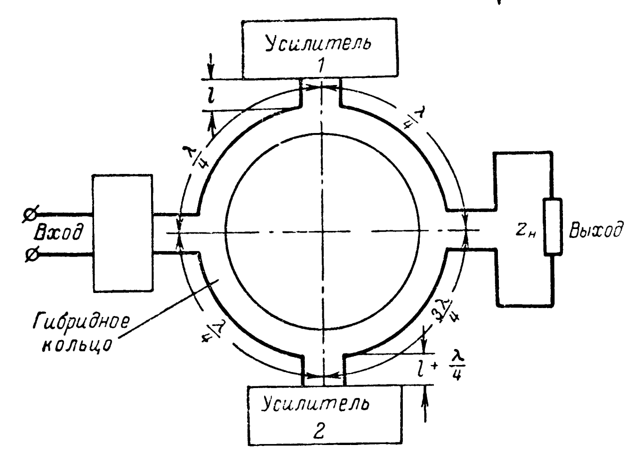


Рис. 24. Усилитель с гибридным кольцом.

$f_{кр}=2{,}1$ *Ггц*) стабильно работал в полосе частот 210—265 *Мгц* с коэффициентом усиления 8 *дб* и коэффициентом шума 1,94 *дб*. Потеря усиления в гибридном соединении составила 3 *дб*.

Глава третья

ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Виды генераторов и их свойства

Достоинствами генераторов на туннельных диодах являются высокий частотный предел, малая потребляемая мощность, высокая стабильность частоты и простота схемы; основным недостатком — малая выходная мощность. В приемно-усилительной технике генератор с туннельным диодом может найти применение в качестве маломощного гетеродина.

Электрическая схема с включенным в нее туннельным диодом в зависимости от параметров схемы и параметров диода может выполнять различные функции. По внешнему виду трудно различить схему усилителя и генератора, так как одна и та же схема может работать как усилитель при выполнении условия устойчивости или как генератор, если суммарные потери диода и схемы полностью скомпенсированы отрицательным сопротивлением туннельного диода.

Для того чтобы генератор возбудился, необходимо выполнить условие, противоположное условию устойчивости:

$$L_\Sigma \geqslant r_\Sigma C_д |-R_д|,$$

где L_Σ — полная индуктивность схемы, состоящая из индуктивности диода $L_д$ и внешней, специально включенной индуктивности L. При этом для предотвращения режима переключения так же как и в усилителе необходимо, чтобы суммарное последовательное сопротивление схемы постоянному току было бы меньше модуля отрицательного сопротивления туннельного диода:

$$r_\Sigma < |-R_д|.$$

Режимы работы схемы с туннельным диодом в зависимости от величины суммарного сопротивления потерь r_Σ представлены на рис. 25:

при $|-R_д| > r_\Sigma > \frac{L_\Sigma}{C_д|-R_д|}$ — стабильное усиление;

при $|-R_д| > r_\Sigma < \frac{L_\Sigma}{C_д|-R_д|}$ — генерация гармонических колебаний;

при $r_\Sigma > |-R_д|$ — двухстабильный режим.

Таким образом, если отношение $r_\Sigma/|-R_д|$ слишком мало или слишком велико, то схема нестабильна. Нестабильность может быть также результатом слишком маленькой величины $C_д/L_\Sigma$.

Простейшая схема генератора может быть представлена в виде последовательно включенных туннельного диода и добавочной индуктивности L, создающей условие самовозбуждения (рис. 26,*а*). Такой простой генератор не нашел широкого применения из-за значительного изменения частоты при изменении напряжения питания и из-за неудовлетворительной формы сигнала. Однако последовательная схема обеспечивает максимальную рабочую частоту, так как в качестве емкости C_1 может использоваться емкость диода $C_д$. Максимально возможная частота генерации последовательной схемы определяется по формуле:

$$f'_р = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{1}{L_\Sigma C_д} - \left(\frac{r_\Sigma}{|-R_д| L_\Sigma C_д}\right)^2}.$$

Рис. 25. Диаграмма различных режимов работы туннельного диода.

На более низких частотах параллельно емкости $C_д$ необходимо добавить дополнительную емкость C_1.

Более стабильную частоту и бо́льшую выходную мощность дает схема с параллельным резонансным контуром (рис. 26,*б*). Чем меньше величина дополнительно включенной индуктивности L, тем меньше амплитуда колебаний. При увеличении L амплитуда колебаний возрастает и предельный цикл может выходить за точки, соответствующие напряжениям U_1 и U_2 (рис. 2), что приводит к значительному увеличению содержания гармоник. Для получения синусоидальных колебаний снижают отношение L/C. Увеличению амплитуды колебаний в параллельной схеме способствует тот факт, что сопротивление потерь туннельного диода $r_д$ шунтируется малым сопро-

гивлением катушки постоянному току, что расширяет предельный цикл, но резко повышает содержание гармоник. Собственная резонансная частота параллельной схемы равна:

$$f''_р = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_\Sigma (C_д + C)} - \frac{1}{R_д^2 C_д (C_д + C)}}.$$

Для увеличения амплитуды колебаний и стабильности частоты применяют неполное включение контура (рис. 26,*г*). При увеличении

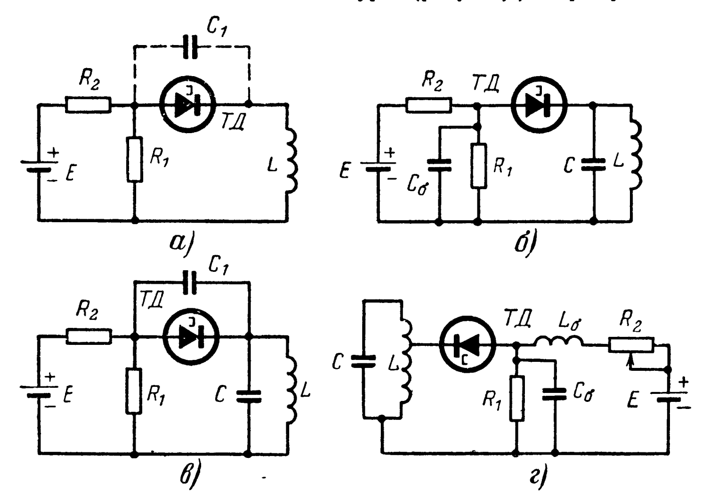
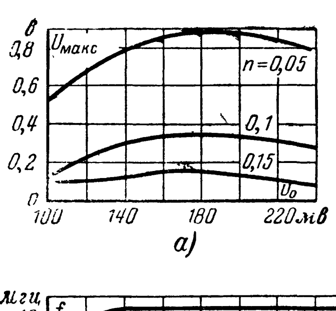


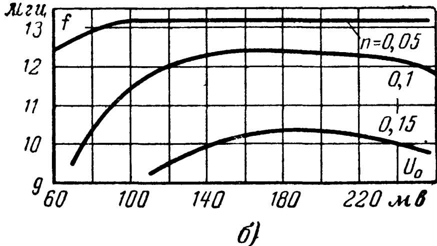
Рис. 26. Схемы генераторов с сосредоточенными параметрами.
а — последовательная схема; *б* — параллельная схема; *в* — последовательно-параллельная схема; *г* — схема генератора с неполным включением контура.

связи диода с контуром частота генератора уменьшается из-за увеличения нелинейности системы и из-за увеличения емкости контура (за счет емкости туннельного диода). С уменьшением коэффициента включения амплитуда колебаний растет, но при некотором значении коэффициента включения происходит срыв колебаний.

Рабочая точка выбирается на середине участка отрицательного сопротивления, где степень нелинейности минимальна. Для повышения стабильности частоты напряжение смещения нужно брать равным $U_0 = (3 \div 5) U_1$.

На рис. 27 приведены зависимости частоты и амплитуды колебаний генератора на германиевом туннельном диоде от напряжения смещения и температуры при различных коэффициентах включения *n*. Зависимость частоты генератора от смещения (рис. 27,*б*) можно использовать для его электронной автоподстройки. При сильной связи с контуром диапазон изменения частоты при изменении напряжения смещения может сильно расшириться. Так, было получено изменение частоты от 9,5 до 12 *Мгц* при изменении смещения (U_0) от 70 до 120 *мв*.





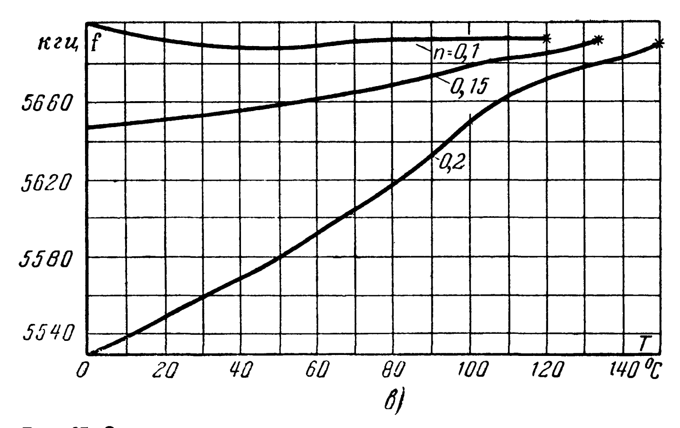


Рис. 27. Зависимости частоты и амплитуды колебаний от напряжения смещения и температуры при различных коэффициентах включения *n* в генераторе на германиевом туннельном диоде.

Неполное включение туннельного диода в контур выгодно и с точки зрения наименьшего влияния изменения температуры на частоту генератора. Однако повышение стабильности частоты генератора путем уменьшения связи туннельного диода с контуром сужает температурные интервалы работы генератора. Генератор может работать в широких интервалах температур лишь при значительной связи туннельного диода с контуром, в противном случае при увеличении температуры наблюдается срыв колебаний (рис. 27,*в*). Срыв колебаний на рисунке отмечен крестиком. Часто более удобно ис-

пользовать последовательно-параллельную схему (рис. 26,*в*), собственная частота которой

$$f'''_р = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_\Sigma (C_1 + C)} - \frac{1}{R_д^2 C_1 (C + C_1)}},$$

где C_1 учитывает емкость туннельного диода. Эта схема позволяет иметь наилучшую стабильность и форму сигнала.

Расчет генератора начинается с выбора диода, способного развить определенную выходную мощность на заданной частоте. Максимальная мощность квазисинусоидальных колебаний (без учета нелинейных искажений), которую может развить туннельный диод, выражается следующим соотношением:

$$P_{макс} = \frac{1}{8}(U_2 - U_1)(I_1 - I_2),$$

предполагая, что колебание напряжения происходит между точками пика и впадины вольт-амперной характеристики диода. У германиевого туннельного диода $U_1 \approx 65$ *мв*, $U_2 \approx 250 \div 350$ *мв*, $I_1/I_2 \approx 8$. Подстановка этих величин в выражение для $P_{макс}$ дает:

$$P_{макс} = \frac{I_1}{40}.$$

Можно и наоборот, по величине требуемой выходной мощности определить пиковый ток, а следовательно, и его тип. Для германиевого туннельного диода

$$I_{1мин} \approx 40 P_{треб}.$$

Величины напряжений U_1 и U_2 зависят только от свойств материала, поэтому максимально отдаваемая мощность зависит практически лишь от I_1. Так, для диода из арсенида галлия $P \approx I_1/14$. Туннельный диод с большим током (рассчитанный на большую отдаваемую мощность) имеет низкую частоту собственного резонанса и высокую критическую частоту. При этом для генераторов с выходной мощностью 10^{-3} *вт* значения сопротивления нагрузки в зависимости от типа диода и частоты генератора лежат в интервале от 3—5 до 10—15 *ом*. Необходимость трансформации таких низких сопротивлений к сопротивлению стандартных передающих линий 50 *ом* приводит к существенному усложнению конструкции генератора.

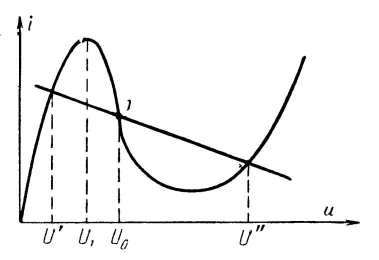


Рис. 28. К графическому методу расчета амплитуды напряжения генератора.

Для определения амплитуды напряжения генератора можно использовать графический метод расчета. Через рабочую точку *1* на вольт-амперной характеристике туннельного диода (рис. 28) проводят линию нагрузки по переменному току. Точки пересечения ее с вольт-амперной характеристикой диода дают два значения напряжения U' и U'' между которыми изменяет-

ся напряжение на диоде. Их полуразность и будет примерно равна амплитуде напряжения генератора. Для нахождения напряжения на контуре нужно полученный результат разделить на коэффициент включения.

Генераторы повышенной мощности

Как уже отмечалось, существенным недостатком генераторов на туннельных диодах является относительно небольшая генерируемая мощность. У генератора на германиевом диоде она составляет 0,25—0,5 *мвт*. Для повышения генерируемой мощности можно использовать несколько диодов, при этом возможно как последовательное, так и параллельное включение их друг относительно друга (рис. 29).

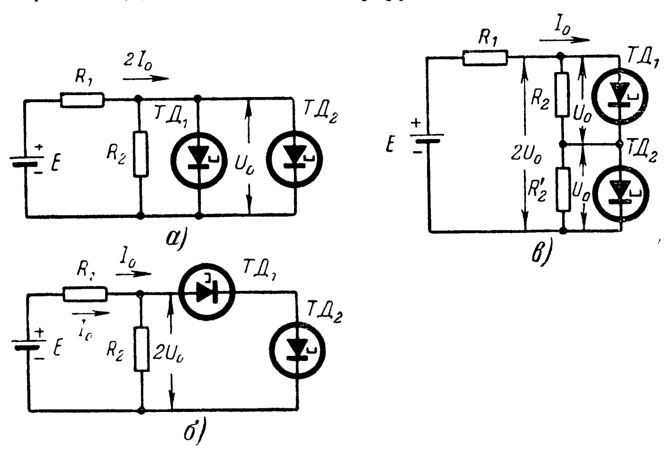


Рис. 29. Схема цепей питания для различных способов включения двух туннельных диодов.

а — параллельное включение; *б* — последовательное включение; *в* — последовательное включение с выполнением условия устойчивости по постоянному току.

С энергетической точки зрения параллельное включение двух туннельных диодов по постоянному току не влияет на к. п. д. схемы, а суммарная вольт-амперная характеристика имеет ток максимума и минимума в 2 раза больший, чем одиночного диода (рис. 30,*а*). Перепад тока $\Delta I = I_1 - I_2$ возрастает в два раза, что позволяет использовать такой генератор для получения в 2 раза большей мощности. Однако потребление мощности от источника питания также удваивается, поскольку общее отрицательное сопротивление эквивалентного диода уменьшается вдвое и для соблюдения условия устойчивости сопротивление резистора R_2 (рис. 29,*а*) нужно также уменьшить вдвое.

Вольт-амперная характеристика для последовательного соединения двух диодов приведена на рис. 30,*б*. При последовательном включении по постоянному току практически невозможно установить рабочую точку на участке отрицательного сопротивления. Поэтому для последовательного включения нужно использовать схему

рис. 29,*в*, где условия устойчивости по постоянному току выполняются одновременно для обоих диодов. Для этой схемы к. п. д. увеличивается в 2 раза по сравнению со схемой на одном диоде.

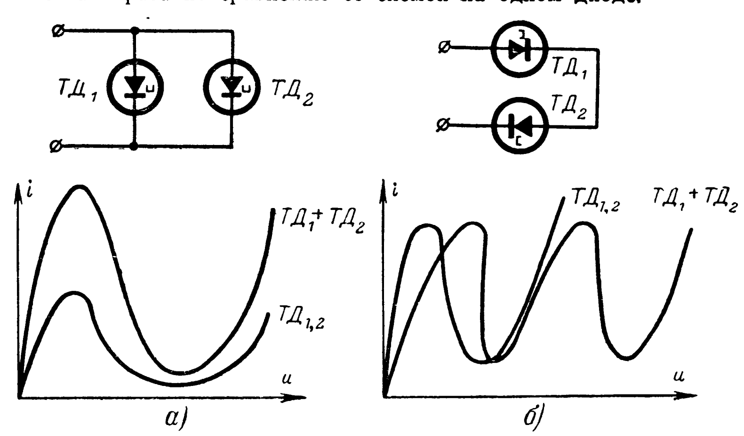


Рис. 30. Суммарные вольт-амперные характеристики туннельных диодов.

Высокочастотные свойства схемы оцениваются по величине предельной частоты генерации. Для схемы генератора с одним туннельным диодом значение этой частоты определяется по формуле:

$$f_{\text{ген}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{д}} |-R_{\text{д}}|} \sqrt{\frac{|-R_{\text{д}}|}{r_{\text{д}} + r_{\text{к}}} - 1},$$

где $r_{\text{к}}$ — сопротивление потерь в контуре.

Для схемы с параллельным включением двух диодов по переменному току предельная частота генерации равна:

$$f'_{\text{ген}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{д}} |-R_{\text{д}}|} \sqrt{\frac{|-R_{\text{д}}|}{r_{\text{д}} + 2r_{\text{к}}} - 1} < f_{\text{ген}},$$

т. е. предельная частота генерации уменьшается по сравнению со схемой на одном диоде. Если потери в контуре малы, то это уменьшение незначительно. Для схемы с последовательным включением двух диодов по переменному току предельная частота генерации равна:

$$f''_{\text{ген}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{д}} |-R_{\text{д}}|} \sqrt{\frac{2|-R_{\text{д}}|}{2r_{\text{д}} + r_{\text{к}}} - 1} > f_{\text{ген}},$$

т. е. предельная частота генерации несколько повышается. Если потери в контуре малы, то это увеличение незначительно.

Для увеличения выходной мощности генератора туннельные диоды нужно включать последовательно как по переменному, так и по постоянному току. Чтобы форма генерируемого сигнала была близка к синусоидальной, необходимо выполнить условия

$$R_{\text{н}} \approx |-R_{\text{д}}| \text{ и } R_{\text{н}} > |-R_{\text{д}}|$$

Так как сопротивление нагрузки $R_н$ обычно значительно больше $|R_д|$, то для выполнения этих условий следует применить неполное включение контура. На рис. 31 приведена практическая схема такого генератора.

При последовательном соединении двух диодов возрастает отрицательное сопротивление эквивалентного диода, что позволяет нагружать генератор бо́льшим сопротивлением. Ухудшение формы

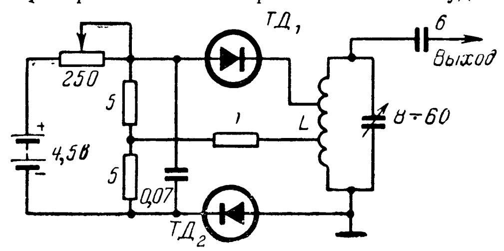


Рис. 31. Практическая схема генератора с неполным включением контура.

генерируемых колебаний при этом не наблюдается. Если нагрузка слишком мала и условия генерации синусоидального сигнала не выполняются, то применяют параллельное включение двух диодов, так как при этом уменьшается отрицательное сопротивление эквивалентного диода.

Генераторы с кварцевой стабилизацией

Так как частота генератора зависит от параметров туннельного диода, которые изменяются при изменении напряжения смещения и температуры, то для получения необходимой стабильности частоты нужно применять соответствующие схемы стабилизации.

Если требуется высокая стабильность частоты, то применяют схемы с кварцевой стабилизацией. Основные требования к такому генератору — генерирование колебаний только на частоте $f_{кв}$, определяемой кварцем. Это означает, что в автогенераторе не должны возникать колебания на других частотах и что генерация должна срываться при удалении кварца из схемы. Однако подключить кварц непосредственно параллельно туннельному диоду не представляется возможным, поскольку последовательное сопротивление кварца $r_{кв}$ в большинстве случаев меньше модуля отрицательного сопротивления диода ($r_{кв} = 10 \div 30$ *ом*, $|-R_д| \approx 100 \div 150$ *ом*).

На рис. 32,*а* представлена одна из возможных схем генератора с кварцем. На всех частотах, кроме частоты последовательного резонанса кварца, общее сопротивление потерь r_Σ таково, что условие самовозбуждения не выполняется. На рабочей частоте схемы, определяемой собственной частотой кварца, величина r_Σ уменьшается настолько, что выполняется условие

$$L_\Sigma > r_\Sigma \, |-R_д| \, C_д.$$

Это достигается благодаря тому, что на частоте своего последовательного резонанса кварц имеет очень малое активное сопротивление и резисторы R_2 и R_1 включаются параллельно. На всех других

частотах, отличных от частоты последовательного резонанса кварца $f_{кв}$, суммарное сопротивление потерь r_{Σ} оказывается слишком велико, чтобы схема возбудилась. Таким образом, генерация возможна лишь на одной частоте $f_{кв}$. Эта схема генератора с кварцевой

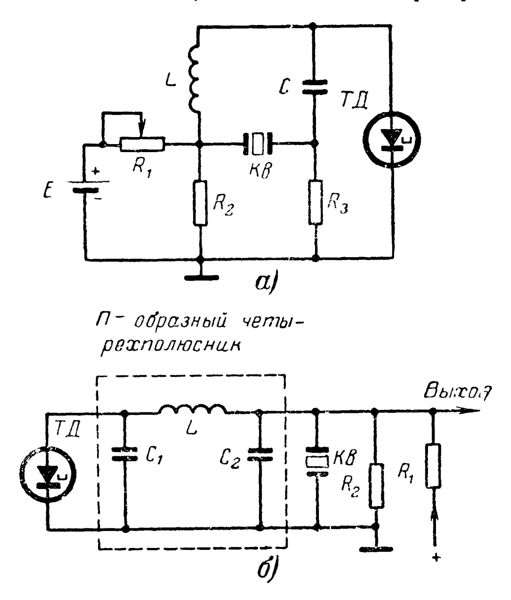


Рис. 32. Схемы задающих генераторов на туннельном диоде с кварцевой стабилизацией.

стабилизацией использовалась в качестве датчика временных интервалов для ультрастабильного хронометра, имеющего максимальную ошибку всего в несколько секунд за год.

В других схемах для выполнения условия самовозбуждения предусматриваются элементы для согласования сопротивлений туннельного диода и кварца. Такими элементами могут быть трансформатор или другой четырехполюсник.

При применении трансформатора необходимое согласование сопротивлений осуществляется подбором соответствующего числа витков обмоток. Недостаток такого согласующего элемента заключается в том, что в случае неисправности кварца не происходит срыва колебаний и схема продолжает генерировать на неопределенной нестабилизированной частоте. Это происходит потому, что при неисправном кварце его сопротивление, пересчитанное к диоду, значительно возрастает и условие генерации сохраняется.

В качестве трансформирующего элемента можно применить также П-образный четырехполюсник, обладающий трансформирующими свойствами четвертьволновой линии (рис. 32,*б*). Четырехполюсник должен обеспечить трансформацию сопротивления туннельного диода к сопротивлению кварца на частоте его последовательного резонан-

са. Характеристическое сопротивление четырехполюсника ρ равно:

$$\rho = \sqrt{r_{кв} |-R_д|}.$$

Зная ρ можно определить параметры четырехполюсника L и C.

Описанный в зарубежной литературе генератор такого типа работает на частоте 40 *Мгц* при нестабильности частоты $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ на 1° С, причем уход частоты за счет изменения напряжения питания на ±6% составляет $3 \cdot 10^{-7}$ от общего ухода частоты. Для туннельного диода типа 1N2939, или 1N3712 ($|-R_д| = 120$ *ом*) выходная мощность составляет 12 *мквт*, а спектр генерируемых колебаний не имеет побочных частот.

Генераторы СВЧ

В генераторах СВЧ на туннельных диодах в качестве контуров используют цепи с распределенными параметрами в виде волноводов, коаксиальных кабелей или полосковых линий. Туннельный диод в таких генераторах может работать на частотах ниже или выше частоты собственного резонанса $f_{рез}$. Если диод работает на частотах ниже частоты собственного резонанса, его сопротивление будет емкостным, а при работе на частотах выше частоты собственного резонанса — индуктивным.

При изменении сопротивления нагрузки частота генератора меняется. Форма колебаний может быть искажена из-за нелинейности участка отрицательного сопротивления, поэтому амплитуда колебаний не должна быть больше протяженности линейного участка, что возможно в случае примерного равенства сопротивления нагрузки

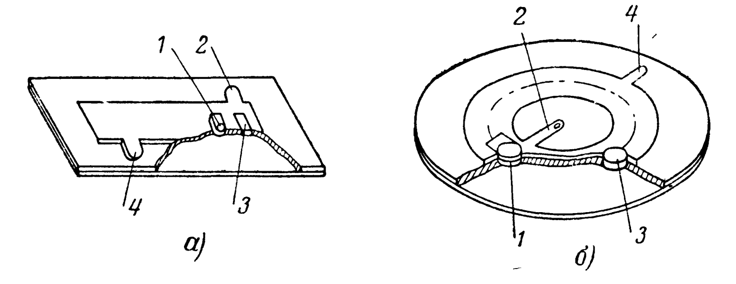


Рис. 33. Генераторы СВЧ на туннельных диодах.

а — с прямым полосковым резонатором; б — с кольцевым полосковым резонатором.

1 — туннельный диод; 2 — вход постоянного тока; 3 — стабилизирующий резистор; 4 — высокочастотный выход.

на относительно низкой частоте и модуля отрицательного сопротивления в рабочей точке. Максимальная выходная мощность для типовых туннельных диодов составляет десятки милливатт. В диапазоне СВЧ последовательная индуктивность диода $L_д$ ограничивает выходную мощность, увеличить которую можно использованием последовательной или параллельной комбинации туннельных диодов или применением кольцевых схем.

На рис. 33 приведены схемы генераторов с прямым и кольцевым полосковыми резонаторами. В практической кольцевой схеме гене-

ратора на полосковой линии передачи использован один туннельный диод из арсенида галлия; на частотах 1,4—1,8 *Ггц* получена мощность 13 *мвт*. Два параллельно соединенных диода дают на частоте 1,55 *Ггц* мощность 26 *мвт*. Использование большего числа параллельно включенных диодов не дает увеличения мощности.

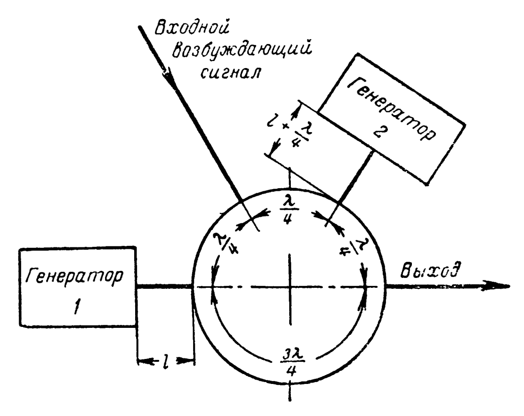


Рис. 34. Кольцевая схема генератора.

Бо́льшие мощности могут быть получены параллельным соединением ряда генераторов. На рис. 34 показана простая кольцевая схема, в которой выходные мощности двух одинаковых генераторов суммируются. Частота колебаний может задаваться внешним сигналом. Подобные схемы могут соединяться последовательно для дальнейшего повышения общей мощности. В зарубежной литературе описан генератор, в котором параллельно соединены восемь генераторов с двумя туннельными диодами из арсенида галлия в каждом. При мощности возбуждающего сигнала 3 *мвт* на частоте 1,56 *Ггц* получена выходная мощность 105 *мвт*. Используемый туннельный диод имел следующие параметры: $I_1=200$ *ма*, $I_2=10$ *ма*, $U_1=230$ *мв*, $U_2=600$ *мв*, $r_д=0{,}5$ *ом*, $C_д=8\div20$ *пф*.

С повышением частоты возможности получения больших мощностей затрудняются. Так, от одного диода на частоте 58 *Ггц* была получена мощность лишь 25 *мквт*, а на частоте 90 *Ггц* — 2 *мквт*. Однако применение специального распределенного генератора с несколькими туннельными диодами позволило иметь выходную мощность 4 *мвт* при частоте 6 *Ггц*.

Интересно отметить, что в диапазоне СВЧ генерация возможна одновременно на двух частотах. В зарубежной литературе описано устройство для генерирования двух независимых друг от друга колебаний разных частот, причем одна из них не является гармоникой другой. Например, были получены колебания на частотах 683 *Мгц* и 7 565 *Мгц* с туннельным диодом типа А650.

Способы перестройки генераторов

В настоящее время создано много широкодиапазонных генераторов, однако очень важно иметь генератор, который не только перестраивался бы, но и позволял осуществлять электронную перестрой-

ку. Одним из способов электронной перестройки является простое изменение напряжения смещения на туннельном диоде. Изменение напряжения смещения приводит к изменению параметров диода, от которых зависит генерируемая частота. Таким методом была получена перестройка генератора в пределах 12% на частоте 1 300 *Мгц*. Поскольку интервал смещений, в котором существует отрицательное

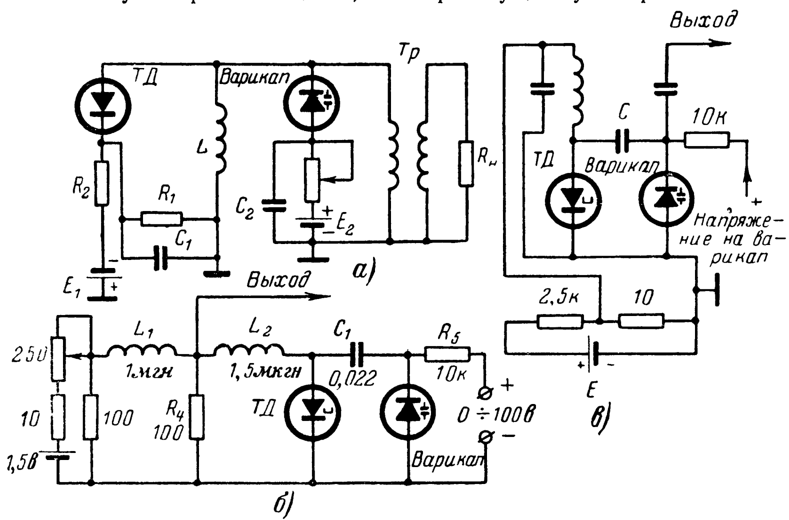


Рис. 35. Схемы генераторов с электронной настройкой с помощью варикапа.

сопротивление, мал, изменение частоты тоже ограничено. Однако в литературе имеются сведения о создании миниатюрного генератора на туннельном диоде типа RCA40062 из арсенида галлия с электрической перестройкой на октаву (900—1 800 *Мгц*). Напряжение смещения менялось в пределах 216—450 *мв*, при этом выходная мощность в согласованной нагрузке изменялась от 0,2 до 0,6 *мвт*.

Для изменения частоты генератора в большем диапазоне используют варикапы. На рис. 35,*а* приведена принципиальная схема генератора, настраиваемого таким способом. Варикап представляет собой диод, емкость которого зависит от величины приложенного к нему постоянного напряжения. При изменении смещения на варикапе типа PC-117 на 100 *в* в подобной схеме была получена возможность перестройки частоты генератора от 600 до 900 *Мгц*, что открывает возможность для быстрой дистанционной настройки приемника. При этом выходная мощность равнялась 0,45—0,65 *мвт*. На рис. 35,*б* приведена схема высокочастотного генератора с туннельным диодом 1N2939 или 1N3712 с электронной перестройкой в диапазоне от 200 до 400 *Мгц* и выходной мощностью 0,6 *мвт*. На рис. 35,*в* изображена схема автогенератора с электронной перестройкой в диапазоне 12—22 *Мгц* на туннельном диоде типа 1N2939 и с варикапом типа PC-117-47. При напряжении смещения на диоде 150 *мв* напряжение на варикапе изменялось от 0,4 до 60 *в*. Относительно низкая добротность варикапа в диапазоне СВЧ приводит к значительным потерям мощности.

Еще одним способом электронной перестройки является использование ферритового резонатора с магнитной настройкой, соответствующим образом связанного с туннельным диодом. Перестройка, осуществляемая с помощью магнитной цепи, может дать изменение частоты от 2,5 до 4 *Ггц*, при этом изменение мощности на выходе генератора не превышает 1 *дб*. Такой метод настройки может быть применен на очень высоких частотах вплоть до 100 *Ггц*, причем уже получена возможность изменения частоты на две октавы (600—2 400 *Мгц*).

Глава четвертая

ДЕТЕКТОРЫ

Детектор, работающий в области положительного сопротивления вольт-амперной характеристики диода

При смещении, равном или близком к нулю, туннельный диод может использоваться в качестве широкополосного квадратичного детектора. Нелинейное положительное динамическое сопротивление в этой области позволяет получить большой к. п. д., высокую чувствительность и хорошую линейность по всему динамическому диапазону. Еще одним преимуществом туннельного диода как детектора является значительно более низкий уровень мерцательного шума, чем у обычных полупроводниковых диодов. При смещении, равном нулю, величина выпрямленного тока не зависит от температуры и определяется лишь свойствами полупроводникового материала. Соответствующим выбором параметров материала (уменьшая степень легирования) можно увеличить величину выпрямленного тока, но при этом уменьшается вероятность туннельного эффекта.

Часто для детектирования применяется так называемый обращенный диод, характеристика которого показана на рис. 36. Обращенный диод или совсем не имеет участка с отрицательным сопротивлением или имеет его, но с малым значением пикового тока (10—200 *мка*). Такие диоды оказываются значительно более эффективными выпрямителями малого сигнала, чем обычные полупроводниковые диоды. Детекторы на них нашли применение как в приемниках прямого усиления, так и в измерительных приборах, например для измерения мощности незатухающих колебаний. В качестве детектора незатухающих колебаний германиевый туннельный диод способен обнаруживать незатухающие сигналы с мощностью порядка 10^{-8} *вт*, в то время как измерители мощности с терморезистором или болометром отмечают наличие мощности не менее 10^{-5} *вт*.

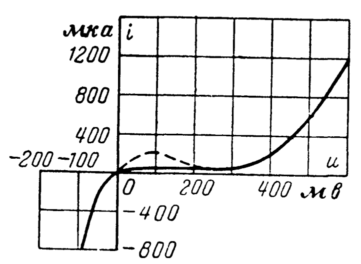


Рис. 36. Вольт-амперная характеристика обращенного диода.

На частоте 10 *Ггц* в приемнике прямого усиления детекторы на обращенных диодах обеспечили чувствительность порядка 10^{-9} *вт*.

Регенеративный детектор

Детектор, обладающий очень высокой чувствительностью, может быть реализован с помощью устройства, основанного на использовании в одной схеме явлений усиления и детектирования. Смещение на диоде должно быть таково, чтобы рабочая точка находилась в области отрицательного сопротивления.

Регенеративный детектор по существу представляет собой усилитель на туннельном диоде, в котором из-за нелинейности вольтамперной характеристики на том же диоде осуществляется и детектирование. При удалении рабочей точки от точки перегиба вольтамперной характеристики (точка *А* на рис. 9) детектирующие свойства схемы улучшаются, а эффективность усилителя падает. В отличие от усилителя регенеративные детекторы не требуют циркулятора, так как не требуется выводить энергию СВЧ. Чтобы уменьшить влияние изменения нагрузки на величину коэффициента усиления и предотвратить обратное излучение в антенну, перед регенеративным детектором ставят ферритовый изолятор, который конструктивно гораздо проще циркулятора. При использовании регенеративного детектора приходится сужать полосу пропускания усилителя.

Экспериментальные исследования показали, что с помощью регенеративного детектора на частоте 980 *Мгц* можно обнаружить сигнал мощностью порядка 10^{-14} *вт*, при этом наилучшая чувствительность по току короткого замыкания 10^{5} *а/вт*. Под чувствительностью по току понимается отношение выпрямленного тока короткого замыкания к максимальной мощности источника сигнала. Однако при приближении к точке, в которой возникает генерация, ухудшается стабильность и сужается полоса пропускания. Так, высокая стабильная чувствительность $5 \cdot 10^{2}$ *а/вт*, соответствовавшая обнаруживаемой мощности 10^{-12} *вт*, имела место при ширине полосы пропускания всего лишь 2% от несущей частоты.

Сверхрегенеративный детектор

В регенеративной схеме детектора при больших значениях коэффициента усиления значительно снижается устойчивость схемы. Сверхрегенеративный детектор позволяет получить высокую чувствительность при достаточной устойчивости. Рабочая точка диода в режиме сверхрегенератора смещается в область отрицательного сопротивления и в контуре выполняется условие для возникновения колебаний. Амплитуда вспомогательного источника должна быть достаточной для периодического срыва этих колебаний.

На рис. 37,*а* приведена схема сверхрегенеративного детектора на частоту приходящих сигналов 6,25 *Мгц*, где E_2 — генератор вспомогательной частоты 100 *кгц*. Обычно генератор вспомогательных колебаний, детектор и усилитель совмещены (рис. 37,*б*). Этот сверхрегенеративный детектор работает на частотах от 100 *Мгц* до 6 *Ггц* и выше при соответствующем подборе элементов резонансной цепи, состоящей из емкости диода и входной индуктивности L_1. Частота вспомогательных колебаний определяется величинами L_2 и C_1 и равна примерно 20 *Мгц*. Для полосы видеочастот 0,2 *Мгц* чувствительность детектора превышает 10^{-10} *вт*, т. е. на 12—15 *дб* выше чувствительности любого детектора с пассивным диодом.

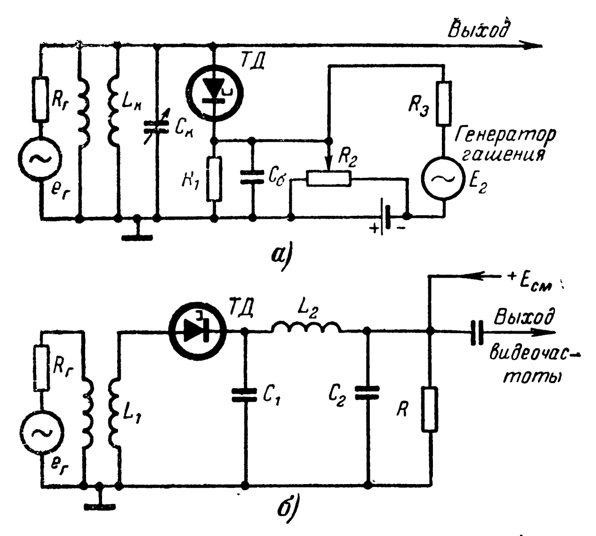


Рис. 37. Схемы сверхрегенеративных детекторов.

Глава пятая

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Возможные способы преобразования частоты

Одним из методов приема слабых сигналов является преобразование сигнала к более низкой (промежуточной) частоте и дальнейшее усиление его на промежуточной частоте. В диапазоне СВЧ, где не применимы обычные электронные лампы для преобразования частоты, до последнего времени применялись кристаллические смесители и гетеродин на клистроне или ЛБВ. Коэффициент передачи такого смесителя меньше единицы при минимальном коэффициенте шума 6—8 *дб*, причем довольно трудно получить достаточно широкую полосу пропускания.

Появившиеся позднее параметрические преобразователи, действие которых основано на использовании нелинейной емкости, обладают меньшим уровнем шума и повышенным коэффициентом передачи. Однако параметрическим преобразователям, работающим при относительно низких промежуточных частотах, свойствен большой коэффициент шума. Параметрический преобразователь, понижающий частоту в 10 раз, имеет дополнительный коэффициент шума в 10 *дб*. Таким образом, при использовании параметрического преобразователя в диапазоне СВЧ для получения низких промежуточных частот невозможно получить малые значения коэффициента шума. Кроме того, параметрический преобразователь является более сложным устройством, так как он требует внешнего генератора накачки, холодильного устройства и др.

Преобразователи с туннельными диодами обеспечивают большой коэффициент передачи (хотя и меньший, чем в усилителе на туннель-

ном диоде) при малом уровне шумов и широкой полосе пропускания. Преобразователь не обладает таким же низким коэффициентом шума, как усилитель. Существует несколько способов использования туннельного диода в качестве преобразователя частоты, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. К этим способам относятся: преобразователь с самовозбуждением, смеситель с отдельным гетеродином; пассивный смеситель.

Преобразователь частоты с самовозбуждением

В преобразователе частоты с самовозбуждением один активный элемент, поэтому такая схема является самой дешевой. Во всех других схемах необходимо использовать два активных элемента — один как гетеродин, другой как собственно смеситель.

Туннельный диод должен быть смещен в область отрицательной проводимости, причем рабочей точкой выбирается точка F (рис. 9), где может быть получено большее усиление преобразования и лучшая стабильность генератора, чем в других точках на падающем участке. При работе в точке A (точка перегиба вольт-амперной характеристики) на выходе образуется значительная по величине вторая гармоника, поэтому эта рабочая точка выбирается для преобразования на гармониках. В преобразователе с самовозбуждением

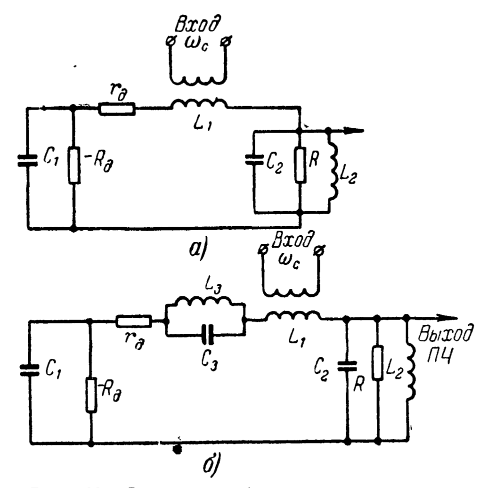


Рис. 38. Схемы преобразователей частоты.

цепь на одном диоде выполняет несколько функций: генерирует частоту гетеродина; усиливает сигнал (на несущей и промежуточной частотах); работает как смеситель.

Могут быть два типа преобразователей с самовозбуждением: преобразователь на основной частоте (рис. 38,*а*), в котором частота сигнала $\omega_с$ связана с генерируемой частотой гетеродина $\omega_г$ соотношением:

$$\omega_с = \omega_г \pm \omega_{пр},$$

где $\omega_{пр}$ — промежуточная частота, и преобразователь на гармониках (рис. 38,*б*), в котором частоты сигнала и гетеродина связаны соотношением

$$\omega_с = 2\omega_г \pm \omega_{пр}.$$

Схема преобразователя на основной частоте состоит из двух контуров, один из которых L_2C_2 настроен на промежуточную частоту, другой — на частоту гетеродина. Элементы L_1C_1 образуют резо-

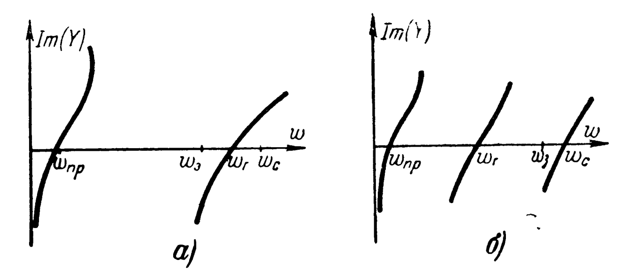


Рис. 39. Характеристики реактивной проводимости преобразователя.
а — **на основной частоте;** *б* — **на второй гармонике.**

нансный контур генератора. Емкость конденсатора C_2 выбирается достаточно большой для того, чтобы он представлял собой малое сопротивление на частотах сигнала и гетеродина.

На рис. 39,*а* показана зависимость реактивной проводимости туннельного диода от частоты. На частоте генерации $\omega_г$ проводимость диода равна нулю, а поскольку частота сигнала и зеркальная частота расположены от частоты генерации на одинаковых расстояниях, то проводимость на зеркальной частоте $\omega_з$ приблизительно равна проводимости на частоте сигнала $\omega_с$. Отсюда следует, что закон распределения шумов в полосе зеркальной частоты совпадает с законом распределения шумов в полосе сигнала. Вторым недостатком этой схемы является возможность взаимодействия между колебаниями сигнала и гетеродина ввиду того, что разность между частотой сигнала и гетеродина может быть не велика; в этом случае при большой амплитуде сигнала гетеродин может «затягиваться» радиосигналом.

Преобразователи на гармониках применяются в том случае, если частоты сигнала и гетеродина расположены слишком близко и возможно явление «затягивания». В таких преобразователях имеется три резонансных контура: гетеродина L_3C_3, сигнала L_1C_1 и промежуточной частоты L_2C_2 и их можно настраивать независимо друг от друга. Контур, резонирующий на частоте сигнала $\omega_с$, настраивается так, чтобы реактивная проводимость на этой частоте была равна нулю. Это означает, что проводимость на зеркальной частоте $\omega_з$ может быть сделана достаточно большой и усиление на этой частоте уменьшится, т. е. шумовые свойства прибора улучшаются (рис. 39,*б*). Поскольку частоты сигнала и гетеродина достаточно далеко отстоят друг от друга, то возможность «затягивания» частоты гетеродина частотой сигнала значительно уменьшается.

Смеситель с внешним гетеродином

Туннельный диод может быть использован не только в качестве преобразователя, но и как смеситель с отдельным гетеродином, причем в зависимости от выбора режима работы можно рассматривать два случая: когда входное сопротивление смесителя положительно и когда оно отрицательно. При этом свойства смесителя совершенно различны.

Смеситель имеет положительное входное сопротивление, если рабочая точка туннельного диода выбрана в области положительного сопротивления или же рабочая точка находится на подающем участке характеристики, но амплитуда гетеродина выбрана настолько большой, что захватывает область положительного сопротивления. В этом случае схема обладает исключительной стабильностью при изменении сопротивлений нагрузки и генератора и большим динамическим диапазоном, но при этом получаются несколько повышенные значения потерь преобразования и шумов. Однако последние показатели все же значительно лучше, чем у смесителя с обычным кристаллическим диодом. Так, экспериментальный смеситель имел потери преобразования (величина, обратная коэффициенту усиления) 0 *дб* и коэффициент шума около 3 *дб.*

Для того чтобы смеситель имел отрицательное входное сопротивление, необходимо рабочую точку туннельного диода поместить на падающем участке характеристики, или, если она на участке с положительным сопротивлением, необходимо иметь значительную величину амплитуды гетеродина, чтобы иметь возможность захватывать участок отрицательного сопротивления.

Такой смеситель обеспечивает большой коэффициент усиления при преобразовании и малые шумы, но весьма чувствителен к изменениям сопротивлений нагрузки и генератора и имеет ограниченный динамический диапазон.

В качестве примера можно привести данные, полученные со смесителем, работающим на частоте 1 200 *мгц* и имеющим промежуточную частоту 30 *Мгц*. Смеситель выполнен на туннельном диоде 1N3218A и при коэффициенте усиления при преобразовании 26 *дб* имел коэффициент шума 4,7 *дб.*

Схема экспериментального смесителя на частоту 100 *Мгц* приведена на рис. 40. В схеме предусмотрены два фильтра с последовательным резонансом L_3C_3 и L_2C_2, служащие для уменьшения шумов по зеркальному каналу и каналу промежуточной частоты соответственно. При усилении 4,6 *дб* в этой схеме был получен коэффициент шума 13,2 *дб.*

Пассивный смеситель

В качестве смесителя может быть использован обращенный диод при нулевом смещении. Был исследован балансный смеситель на обращенных диодах (для подавления шума гетеродина) для преобразования частоты 100 *Мгц* непосредственно в частоту 5 *кгц*, который имел коэффициент шума 7 *дб*, в то время как аналогичные смесители на точечных диодах имеют коэффициент шума 30—40 *дб.* Смеситель на обращенных диодах значительно менее чувствителен к изменению сопротивлений нагрузки и источника сигнала и к повреждениям от случайных механических и электрических перегрузок, чем смеситель на туннельном диоде.

В заключение на рис. 41—43 приведены некоторые практические схемы преобразователей на туннельных диодах.

Преобразователь частоты с кварцевой стабилизацией (рис. 41) выполнен на германиевом туннельном диоде типа 1N3712 и пред-

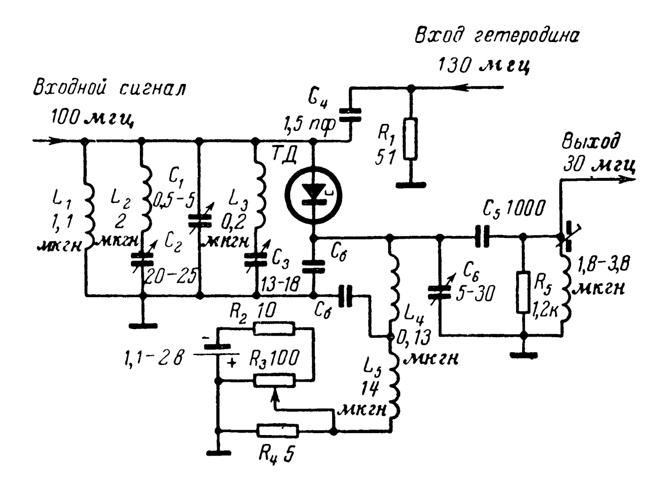


Рис. 40. Схема смесителя на частоту 100 *Мгц* на туннельном диоде с внешним гетеродином.

назначен для преобразования частоты 4,46 *Мгц* в радиочастоты (несколько сотен килогерц). Схемы переключателей телевизионных ка-

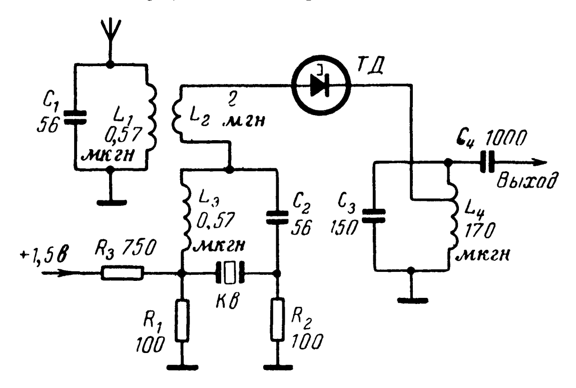


Рис. 41. Преобразователь с кварцевой стабилизацией.

налов (рис. 42 и 43) собраны на диодах типа 1N3713. Последняя схема предназначена для работы в диапазоне частот 470—850 *Мгц*. Она обеспечивает чувствительность 6,9—10,3 *мкв* при полосе пропускания 6 *Мгц* и коэффициенте шума 13,9—15,5 *дб*.

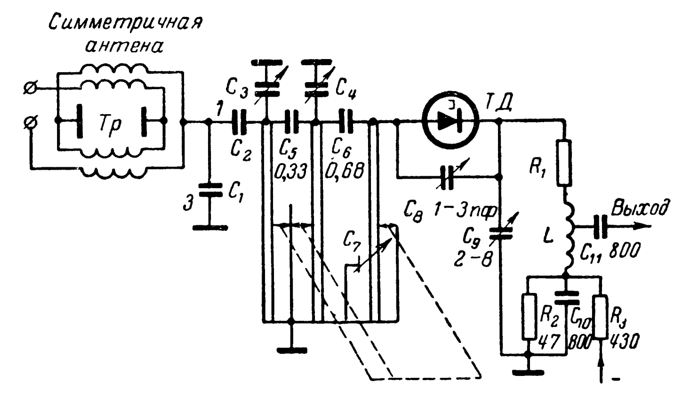


Рис. 42. Переключатель телевизионных каналов.

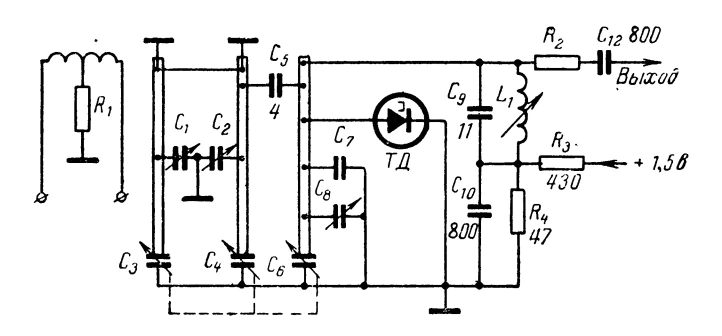


Рис. 43. Переключатель телевизионных каналов дециметрового диапазона с емкостной настройкой.

Заключение

В настоящее время не все возможности туннельного диода используются в полной мере. Например, усилитель с туннельным диодом может потреблять мощность, на порядок меньшую, чем аналогичный усилитель на транзисторах, но из-за отсутствия соответствующих источников питания потребляемые мощности незначительно отличаются друг от друга. Пока не найден достаточно эффективный и простой способ для развязки отдельных каскадов в диапазоне относительно низких частот, что затрудняет построение многокаскадных схем. Последнее в свою очередь затрудняет использование туннельных диодов в усилителях на частотах примерно до 100 *Мгц*. Кроме того, транзисторы в этом диапазоне обладают достаточно хорошими усилительными свойствами, и построение многокаскадных усилителей на них не вызывает затруднений.

Однако для работы при высоких температурх (300—400° С), а также в условиях повышенной ядерной радиации даже на низких частотах преимущественно туннельных диодов неоспоримо. Хоро-

шие результаты дают комбинированные схемы, в которых применяются и транзисторы и туннельные диоды.

Наиболее перспективно применение усилителей на туннельных диодах в диапазоне СВЧ, где транзисторы уже не могут обеспечить необходимого усиления и коэффициента шума. В этом диапазоне лучшими показателями обладают параметрические усилители, но они требуют специального генератора накачки и не могут работать при высоких температурах. В диапазоне СВЧ довольно просто решается задача каскадного соединения усилителей, поскольку созданы устройства, обеспечивающие направленность распространения сигнала. В настоящее время построены усилители, работающие на частоте до 85 *Ггц*, а также усилители с полосой пропускания свыше октавы.

Перспективно применение туннельных диодов и в СВЧ генераторах. Так, например, изготовлен прибор, генерирующий на частоте 103 *Ггц*. Основным недостатком генераторов на туннельных диодах является малая выходная мощность, для увеличения которой приходится усложнять устройство. Генераторы на туннельных диодах, стабилизированные кварцем, могут обеспечить весьма высокую стабильность частоты и используются в качестве стабильных гетеродинов, делителей частоты, хронометров и др. Разработаны и созданы маломощные передатчики на туннельных диодах с автомодуляцией. В генераторе на туннельном диоде можно осуществить электронную настройку, поэтому такой генератор может быть использован в гетеродине многодиапазонного приемника.

В супергетеродинных приемниках туннельные диоды применяются для создания преобразователей частоты, причем один и тот же диод может быть использован в качестве и смесителя и гетеродина. При этом в ряде случаев можно обойтись без предварительного усилителя высокой частоты, так как преобразователь на туннельном диоде обеспечивает достаточно малый коэффициент шума и малые потери преобразования (даже может дать усиление).

В диапазоне СВЧ, где для преобразования частоты не применимы электронные лампы, преобразователь на туннельном диоде заменяет малоэффективный кристаллический смеситель на обычном полупроводниковом диоде и громоздкий гетеродин на ЛБВ или клистроне. В качестве детекторов туннельные диоды могут обеспечивать хорошую чувствительность и значительный коэффициент передачи.

Хотя туннельный диод появился на 10 лет позже транзистора, уже сейчас многие устройства с туннельными диодами превосходят по качественным показателям аналогичные устройства на транзисторах и ЛБВ и значительно проще параметрических и квантовомеханических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник статей «Туннельные диоды» под ред. В. И. Фистуля, Изд-во иностр. лит., 1961.

2. Горюнов Н. Н., Кузнецов А. Ф., Экслер А. А., Схемы на туннельных диодах, «Энергия», 1965.

3. Ржевкин К., Туннельные диоды, «Радио», 1964, № 11.

4. Сборник статей «Полупроводниковые приборы и их применение», под ред. Я. А. Федотова, вып. 7, изд-во «Советское радио», 1961.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 15 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»